COURS
DE PHYSIQUE

DE

L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

PAR M. J. JAMIN,

Ancien Élève de l'École Normale, Professeur de Physique à l'École Polytechnique

---

TOME TROISIÈME. — (PREMIER FASCICULE).

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

PARIS,

MALLET-BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,

Quai des Augustins, 55.

1861





COURS
DE PHYSIQUE

DE

L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

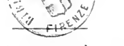
PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

COURS
DE PHYSIQUE

DE

L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

PAR M. J. JAMIN,
Ancien Élève de l'École Normale, Professeur de Physique à l'École Polytechnique



TOME TROISIÈME,

ILLUSTRÉ DE 480 FIGURES DANS LE TEXTE
ET DE CINQ PLANCHES SUR ACIER

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1866

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME TROISIÈME.





Pages

COURS
DE PHYSIQUE
DE
L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

SOIXANTE ET UNIÈME LEÇON.

DES COURANTS ÉLECTRIQUES ET DES MOYENS DE LES MESURER.

Définition des courants. — Hypothèses sur la constitution des courants. — Expérience d'Œrsted. — Galvanomètre. — Intensité des courants. — Boussoles des sinus et des tangentes. — Quantité d'électricité. — Interrupteurs et commutateurs.

Quand on charge un condensateur électrique, on accumule sur ses deux faces des quantités considérables et sensiblement égales d'électricités contraires, et lorsqu'on réunit les armatures par un arc conducteur, il donne issue aux deux fluides qui le traversent en sens opposé et devient le siége d'un mouvement électrique complexe : ce mouvement est ce que l'on nomme *un courant électrique*

Pendant sa durée, des phénomènes très-variés se manifes-



tent dans le conducteur : généralement celui-ci s'échauffe ; s'il est métallique, il peut se fondre ; s'il est combustible, il s'enflamme ; s'il contient de l'eau, ou des oxydes, ou des sels, ils sont en partie décomposés, et quand il est formé par un organe animal, il éprouve des commotions violentes.

Dans l'exemple que nous venons de citer, le courant ne dure qu'un instant ; mais si une cause convenable pouvait rendre aux armatures, d'une manière continue, les fluides qui s'écoulent par le conducteur, les phénomènes que nous rappelons seraient continus eux-mêmes et dureraient autant de temps que le courant. C'est en effet ce qui arrive, bien qu'avec une moindre énergie, quand on réunit les conducteurs opposés d'une machine d'Armstrong ou de Nairne, ou même quand on fait communiquer une machine ordinaire avec le sol qui agit comme un corps chargé négativement.

Tout le monde sait plus ou moins vaguement qu'il existe des piles électriques dont la propriété essentielle est de produire et de renouveler incessamment des quantités notables de fluides contraires à leurs deux extrémités qu'on nomme *pôles*, et par conséquent de donner naissance à des courants continus dans tous les conducteurs que l'on joint à ces pôles. Cette notion vague nous suffit pour le moment et nous autorise, avant d'avoir fait aucune étude des piles, à les employer empiriquement comme des sources électriques propres à engendrer des courants continus que nous étudierons. Nous reconnaîtrons aisément qu'ils offrent pendant toute leur durée les mêmes propriétés que les décharges d'un condensateur, maintiennent les fils conducteurs à une température élevée et constante, déterminent une décomposition persistante des composés qu'ils traversent, et produisent des commotions continues dans les organes animaux.

S'il est aisé de prévoir ainsi, par analogie, les effets généraux des courants, il est plus embarrassant de se faire une idée exacte de la nature du mouvement électrique qui les constitue. La première pensée qui vienne à l'esprit est que les deux fluides se mettent réellement en marche en sens opposé sous la forme de deux courants élémentaires, l'un d'électricité positive allant du pôle positif au pôle négatif, l'autre d'électricité négative s'écoulant dans une direction opposée. A la ri-

gueur, on expliquerait tout aussi bien la recomposition des deux fluides accumulés aux pôles si l'on admettait l'existence d'un seul de ces deux courants élémentaires, et comme on manque de renseignements sur ce point, on peut supposer ou que le fluide positif seul abandonne le pôle positif pour aller neutraliser le fluide contraire du pôle opposé, ou bien que c'est le fluide négatif qui va retrouver le pôle positif à travers le conducteur.

A côté de ces deux hypothèses, il y en a une troisième beaucoup plus ingénieuse qui a été proposée par M. de la Rive. Décomposons le conducteur interpolaire en filets linéaires de molécules A, B, C,... (*fig.* 462), soumises à l'influence élec-

Fig. 462.

trique des deux pôles + M et — N qu'elles réunissent. Au premier moment, elles se chargent de fluide + aux extrémités qui regardent — N, et d'électricité — à celles qui sont tournées vers + M, de sorte que les parties juxtaposées de deux molécules contiguës prennent des charges contraires. Cette séparation par influence augmente rapidement jusqu'au moment où les fluides opposés ont acquis une tension suffisante pour vaincre la résistance des espaces intermoléculaires; alors ils se recombinent, tout le conducteur est ramené à l'état naturel, une portion constante de fluide — a avancé d'un rang de molécule à molécule vers + M, une quantité égale de fluide + a reculé inversement d'un rang vers — N, les deux pôles sont partiellement déchargés et aussitôt après la pile agit pour reproduire leur tension primitive. Alors les circonstances étant redevenues les mêmes qu'à l'origine, la même action recommence et se continue tant que dure la communication.

Entre trois hypothèses également possibles, il serait difficile de choisir si nous ne devions chercher à nous représenter le courant par un mouvement de mécanique moléculaire capable d'expliquer à la fois tous les phénomènes de l'électrodynamique. Or la dernière, qui a déjà l'avantage de dériver par

extension des lois de l'influence électrique, est la seule qui puisse interpréter les actions chimiques et beaucoup d'autres faits qui se présenteront dans la suite : c'est donc celle-là seulement que nous conserverons comme explication au moins provisoire. Mais il est nécessaire de ne point méconnaître son caractère hypothétique et de n'en faire dépendre ni l'étude, ni l'expression des phénomènes.

On convient de dire que le courant *va du pôle positif au pôle négatif* et l'on figure sa direction par une flèche

$$+ \mathrm{M} \ldots \rightarrow \ldots - \mathrm{N}.$$

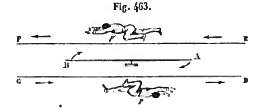
Cela n'implique aucune idée sur la nature du mouvement électrique; c'est une expression et une représentation graphique conventionnelles qui fixent la position des pôles par rapport au conducteur qui les réunit. Dans beaucoup de phénomènes, on est obligé d'avoir recours à une personnification plus précise du courant. On suppose qu'il traverse un observateur en entrant par les pieds et en sortant par la tête, puis, identifiant ce courant avec cet observateur, on dit qu'il a une face, un dos, une droite et une gauche, c'est la face, le dos, la droite ou la gauche de l'observateur. Cela admis, nous allons chercher par quelles méthodes expérimentales nous pourrons reconnaître l'existence des courants et mesurer leurs intensités.

EXPÉRIENCE D'ŒRSTED. — OErsted découvrit en 1819 une des plus fécondes propriétés des courants : il reconnut que toute aiguille aimantée placée dans leur voisinage prend une nouvelle position d'équilibre et se dévie d'un angle δ. On peut faire l'expérience en plaçant le courant en EF, dans le méridien magnétique, au-dessus d'une aiguille AB mobile sur un pivot (*fig.* 463). Si ce courant est intense et très-près de l'aiguille, δ est égal à 90 degrés; s'il décroît ou s'éloigne progressivement, la déviation diminue. Il en serait de même si le conducteur était au-dessous de l'aiguille en CD ou s'il occupait une position quelconque dans le plan CDEF.

L'aiguille étant fixée sur un pivot, il est évident que l'action se réduit à un couple. Pour trouver la direction de ce couple,

commençons par placer dans le voisinage un barreau fixe dans

Fig. 463.



une situation telle, qu'il rende les oscillations de l'aiguille extrêmement lentes et détruise sensiblement l'effet que la terre exerce sur elle, alors elle n'est plus soumise qu'à l'action du courant, et l'on reconnaît qu'elle se dévie toujours de 90 degrés, quelles que soient l'intensité de ce courant et sa direction dans le plan CDEF; donc le couple est perpendiculaire au plan passant par le courant et par le pivot de l'aiguille.

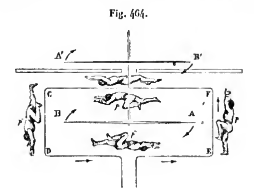
Si l'on veut maintenant fixer le sens de la déviation qui est celui du couple, il suffit de se figurer l'observateur p' qui personnifie le courant et de le tourner de manière qu'il regarde l'aiguille; c'est vers sa gauche que le pôle austral est toujours déplacé, que le courant soit vertical ou horizontal, au-dessus ou au-dessous de l'aiguille.

On comprend maintenant tout le parti qu'on va pouvoir tirer de cette propriété. On reconnaîtra qu'un courant passe dans un conducteur s'il dévie une aiguille aimantée voisine; on mesurera son intensité par la grandeur de la déviation, et l'on déterminera sa direction en considérant le sens du déplacement du pôle austral qui se dirigera vers sa gauche; mais, pour opérer avec commodité, on a imaginé un instrument spécial, le galvanomètre.

GALVANOMÈTRE. — On replie le fil conducteur autour de l'aiguille AB sur un cadre DEFC (*fig.* 464). Chacun des côtés du rectangle agit de manière à dévier le pôle austral vers la gauche du courant. Or, que l'on suppose d'abord l'observateur en p sur EF, et qu'on le fasse ensuite glisser sur le fil pour l'amener en p', p'', p''', avec la condition qu'il regarde toujours l'aiguille, sa droite reste dirigée en arrière et sa gauche en avant du ta-

bleau, et, par suite, toutes les parties du rectangle concourent

Fig. 464.



à imprimer à l'aiguille une déviation de même sens, indiquée par les flèches A et B. On ramène ensuite le fil de manière à former un second rectangle superposé au premier, ce qui double l'action, et si l'on fait mille tours égaux, l'effet devient mille fois plus grand : de là le nom de *multiplicateur* que l'on donne à cet instrument, qui permettra de produire une déviation appréciable avec un courant trop faible pour agir directement, d'une manière sensible, sur une aiguille aimantée.

Cependant cette déviation est toujours restreinte par la force directrice de la terre, qui ramène l'aiguille dans le méridien magnétique ; mais on peut encore augmenter la sensibilité de l'appareil en employant un système de deux aiguilles opposées AB, A'B' fixées à une tige verticale qui les rend solidaires. La terre agit inversement sur chacune d'elles et produit sur leur système un couple résultant égal à la différence de ceux qui dirigeraient séparément l'une et l'autre, et qui sera de plus en plus faible quand le magnétisme des deux aiguilles sera de moins en moins différent. D'un autre côté, l'effet total du courant sur le système se composera de celui qui s'exerce sur l'aiguille AB, lequel est, comme précédemment, représenté par les flèches A et B, et aussi de l'action exercée sur A'B', action qu'il faut étudier : or elle se réduira sensiblement à l'effet de la partie FC qui est prédominante, parce qu'elle est la plus rapprochée. Si donc on retourne l'observateur p' pour qu'il regarde A'B', il aura sa gauche derrière le tableau, et il y chas-

sera le pôle A′ dans le même sens que la flèche A. Conséquemment, l'addition d'une seconde aiguille a le double avantage de diminuer autant qu'on le veut le couple terrestre et d'augmenter le couple produit par le courant; et si l'on se rappelle que celui-ci est proportionnel au nombre des tours, on voit que la sensibilité de l'appareil ne sera limitée que par des difficultés de construction.

Les *fig.* 465 et 466 représentent, la première une coupe, la seconde l'aspect général d'un galvanomètre. L'appareil repose

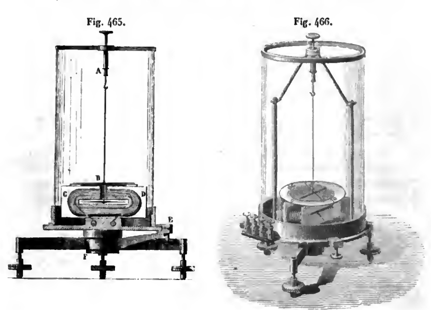


Fig. 465. Fig. 466.

sur un pied à vis calantes et tourne autour d'un axe vertical F qui permet de l'orienter; une vis de pression E le fixe invariablement quand il est réglé. Le cadre CD est en cuivre, il est percé d'un trou vertical B, destiné à laisser passer la tige qui réunit les deux aiguilles; il est entouré de fils de cuivre recouverts de soie qui en font le tour un nombre plus ou moins considérable de fois et qui aboutissent à des poupées extérieures AA, BB qu'on voit *fig.* 466; enfin il est recouvert d'un cercle horizontal divisé dont la ligne 0-180 est parallèle aux plans

des fils. Les deux aiguilles sont soutenues à une potence par un fil de cocon AB accroché à un bouton A, que l'on peut soulever ou abaisser, suivant que l'on veut les suspendre librement ou les laisser reposer sur le cadre pour arrêter leurs oscillations. L'aiguille supérieure parcourt les divisions du cercle et mesure les déviations. Le tout est recouvert d'une cloche en verre.

Quand on veut expérimenter, on cale l'appareil, c'est-à-dire qu'on règle les vis de manière que les aiguilles oscillent librement, sans frotter sur aucune des parties du cadre ou du trou central B; puis on le fait tourner autour de son axe F, jusqu'à ce que les aiguilles, dirigées alors par la terre seulement, coïncident avec la ligne o-180 du cercle : on est sûr alors qu'elles sont parallèles aux plans des fils et au couple terrestre. Alors on met l'appareil en communication avec les fils qui conduisent le courant. Pour cela, on les engage dans des trous percés sur les poupées terminales A, B, A_1, B_1, et on les serre par des vis latérales disposées à cet effet.

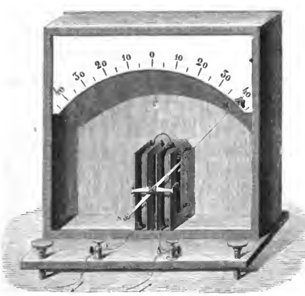
Souvent on dispose deux fils différents sur le cadre; les extrémités de l'un aboutissant à A, A_1, celles de l'autre à B, B_1. On peut mettre l'un d'eux seulement ou tous les deux à la fois dans le courant, ce qui permet de donner à l'appareil plusieurs degrés de sensibilité.

Si les deux fils AA_1, BB_1 sont égaux en longueur et en section et enroulés ensemble, ils produisent la même déviation quand ils sont séparément traversés par le même courant et une déviation nulle s'ils sont à la fois parcourus en sens inverse par des courants égaux. Ce *galvanomètre différentiel* permet conséquemment de reconnaître l'égalité de ces deux courants.

Dans ces derniers temps, M. Ruhmkorff a construit, sur les indications de M. E. Becquerel, un galvanomètre vertical de grande dimension (*fig.* 467). Les deux aiguilles NS, N'S' sont mobiles autour d'un axe horizontal passant par O; l'une d'elles, NS, équilibrée par une masse N, est prolongée par un style SG de 5 décimètres qui parcourt les divisions d'un grand arc de cercle; enfin le cadre galvanométrique CE, BD, divisé en deux parties, est disposé autour des deux aiguilles comme dans le galvanomètre horizontal. Très-peu sensible à cause de sa

masse, ce nouvel instrument n'a d'utilité que dans les démonstrations publiques.

Fig. 467.



INTENSITÉ DES COURANTS. — Il est évident que l'angle de déviation de l'aiguille d'un galvanomètre augmente avec l'intensité d'un courant; mais nous allons voir qu'il ne la mesure pas. L'intensité des courants est une grandeur comme toutes les autres; elle devient double, triple ou quadruple, etc., si l'on fait passer à la fois dans le même conducteur deux, trois, quatre, etc., courants égaux. En général, deux courants sont dans le rapport de m à n s'ils sont formés par la superposition, le premier de m, le second de n courants égaux qui leur servent de commune mesure, et en prenant celle-ci pour unité, ils sont exprimés par les nombres m et n.

Cela posé, lorsqu'on fait passer un courant d'intensité i dans un galvanomètre, il dévie l'aiguille d'un angle δ, et quand elle est dans cette position, il agit sur elle suivant un couple qui fait équilibre à l'action terrestre; or le moment de ce couple est proportionnel, 1° au moment magnétique M de chaque ai-

guille; 2° à l'intensité du courant, car si l'on superposait deux courants égaux, ce qui ferait un courant double, ils donneraient deux couples égaux qui s'ajouteraient; 3° à une fonction complexe, qui nous est inconnue, de la distance des pôles à tous les éléments du courant, fonction qui dépend de toutes les circonstances de construction de l'instrument, mais qui pour un appareil donné ne varie qu'avec la déviation δ, puisque c'est la seule cause qui fasse changer la position des pôles par rapport au courant. En la représentant par $f(\delta)$, le oment C du couple exercé par le courant sera

$$C = iMf(\delta).$$

Si ensuite on fait circuler dans le même galvanomètre un autre courant d'intensité i', la déviation deviendra δ', et l'on aura

$$C' = i'Mf(\delta'),$$

par suite,

$$\frac{i}{i'} = \frac{C}{C'}\frac{f(\delta')}{f(\delta)};$$

ce qui veut dire que le rapport des intensités des deux courants ne sera pas égal à celui des couples de déviation, et à fortiori ne sera pas représenté par le rapport des déviations observées. Mais si l'on opère dans des conditions telles, que l'aiguille conserve toujours la même position par rapport au cadre, $f(\delta)$ sera égal à $f(\delta')$, et le rapport des intensités sera égal à celui des couples C et C'. Cette condition est réalisée par les appareils suivants que l'on doit à M. Pouillet.

BOUSSOLES DES SINUS ET DES TANGENTES. — La *fig.* 468 représente un galvanomètre modifié. Le cadre GH est un cercle vertical de cuivre sur lequel s'enroulent les fils conducteurs et au centre duquel est une boussole horizontale DIE. Suivant les cas, l'aiguille de cette boussole peut avoir une longueur égale au diamètre du cercle horizontal DE ou elle doit être très-petite NS, et alors elle est prolongée jusqu'aux divisions de DE par une flèche de cuivre LL. Le tout est mobile autour d'un axe vertical au centre d'un cercle azimutal AB qui est fixe, et une alidade C mesure sur ce cercle les déplace-

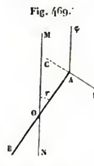
ments du cadre GH. On peut employer cet appareil de deux manières :

Fig. 468.



I. Plaçons d'abord le cadre dans le méridien magnétique, et figurons par MN (*fig.* 469) le plan vertical commun du cadre GH, de l'aiguille I et de la ligne o-180 du cercle DE, puis notons la position de l'alidade C sur le cercle AB. Au moment où un courant passera dans les fils, l'aiguille se déplacera; alors faisons tourner le cadre dans le sens de la déviation δ jusqu'à ce qu'elle devienne nulle, c'est-à-dire jusqu'au moment où l'aiguille, le cadre et la ligne o-180 se retrouveront confondus dans un autre plan vertical OA, et mesurons le déplacement r de l'alidade C, ou l'angle MOA.

Fig. 469.



Nous aurons

$$C = iMf(o).$$

Or comme l'aiguille sera en équilibre entre la force terrestre φ qui agit dans le méridien magnétique et l'action F du courant,

laquelle est perpendiculaire au cadre, il faut que

$$AC = \varphi \sin r = F.$$

En désignant par $2l$ la longueur de l'aiguille,

$$2l\varphi \sin r = 2lF.$$

$2l\varphi$ est le moment magnétique de l'aiguille ou M, $2lF$ est le moment C du couple produit par le courant, et l'on a

$$M \sin r = C = iMf(o)$$

et enfin

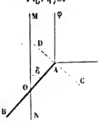
$$i = \frac{1}{f(o)} \sin r = k \sin r.$$

Ce qui veut dire que l'intensité est indépendante du moment magnétique et qu'elle est proportionnelle, 1° au sinus du déplacement r de l'alidade C, de là le nom de ***boussole des sinus*** donné à l'instrument; 2° à un facteur $\frac{1}{f(o)} = k$ variable d'un appareil à un autre, mais constant pour le même. Il en résulte que certaines boussoles seront plus sensibles que d'autres, mais que toutes donneront le même nombre pour exprimer le rapport des intensités de deux courants.

Il est inutile que le cadre soit grand : plus il sera petit, plus l'appareil aura de sensibilité. On peut donc laisser à cette boussole la forme ordinaire du galvanomètre et se contenter d'ajouter à la base un cercle azimutal et une alidade pour mesurer r.

II. On peut, en second lieu, opérer avec l'appareil de la *fig.* 468 comme avec un galvanomètre ordinaire, c'est-à-dire le placer préalablement dans le méridien magnétique, l'y laisser invariablement fixé, et se contenter de mesurer la déviation δ de l'aiguille; mais alors il est nécessaire que cette aiguille soit très-petite et que le cadre ait au moins 2 décimètres de rayon. Si ces conditions sont remplies, les deux pôles seront toujours sensiblement à la même distance des diverses par-

Fig. 470.



ties du courant, $f(\delta)$ sera à peu près constant, et $\frac{1}{f(\delta)}$ pourra se remplacer par k. Alors si nous représentons par OM et OA (*fig.* 470) les directions du méridien magnétique et de l'aiguille, par φ et F les forces résultant de la terre et du courant, il faudra, pour qu'elles soient en équilibre, que

$$2l\varphi \sin\delta = 2l\mathrm{F}\cos\delta = \mathrm{C}\cos\delta,$$

$$\mathrm{M}\sin\delta = i\mathrm{M}f(\delta)\cos\delta,$$

$$i = \frac{1}{f(\delta)}\operatorname{tang}\delta = k\operatorname{tang}\delta.$$

Les intensités seront sensiblement proportionnelles aux tangentes de la déviation de l'aiguille, ce qui a fait donner à cet appareil le nom de ***boussole des tangentes.***

Il est clair que tout galvanomètre satisfait aux mêmes conditions que cette boussole, tant que les déviations sont assez petites pour qu'on puisse admettre que les relations de position de l'aiguille et du cadre n'ont pas été altérées d'une manière sensible, et comme dans ce cas $\operatorname{tang}\delta$ est proportionnelle à l'arc δ, on peut écrire

$$i = k\delta.$$

Les intensités peuvent alors se mesurer par les déviations de l'aiguille.

D'après cela, on pourrait laisser aux boussoles des tangentes la forme des galvanomètres ordinaires, ne point augmenter la dimension de leurs cadres, ce qui est gênant, et diminuer leur sensibilité de manière que les déviations restassent très-petites; mais il serait nécessaire alors de mesurer ces déviations avec une plus grande précision : c'est ce qu'on peut faire en employant la méthode imaginée par Gauss, et que nous avons décrite tome I, page 498, à propos de la déclinaison. La *fig.* 471 représente la boussole de Weber, qui sert aussi à d'autres usages. L'aiguille est remplacée par un barreau NS situé au centre du cadre; il est fixé solidairement à un miroir vertical M qui partage ses mouvements, et celui-ci est soutenu par un écheveau de soie écrue à un treuil A; les divisions de la règle DE se réfléchissent dans le miroir M, et leur image est observée par une lunette fixe C; le déplacement de cette image

permet de conclure, avec une grande exactitude, la déviation



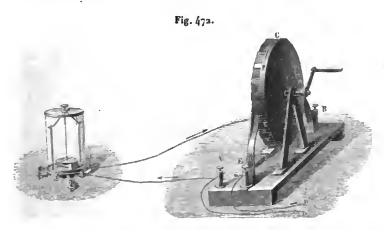
Fig. 471.

du barreau suivant la méthode que nous venons de rappeler. Les fils, fractionnés en trois longueurs, aboutissent aux poupées F et permettent d'opérer avec des sensibilités très-diverses. Enfin le cadre est constitué par une masse considérable de cuivre qui a la propriété, comme nous le verrons dans la suite, d'arrêter presque instantanément les oscillations du barreau et de le ramener à une immobilité complète.

QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ. — On peut considérer sous un autre point de vue l'intensité des courants: quelle que soit l'idée qu'on se fasse du mouvement électrique qui les constitue, ils se réduisent, comme fait, au transport d'une quantité donnée de fluides contraires qui s'écoulent dans le conducteur en sens opposés. Or cette quantité est proportionnelle au temps et à l'intensité du courant, car elle devient double, triple,..., si l'on superpose deux, trois,..., courants égaux. Donc l'intensité déterminée par les boussoles que nous venons de décrire doit mesurer la quantité d'électricité qui s'écoule pendant des temps égaux. C'est ce que M. Pouillet a vérifié par une fort belle expérience.

Il a fait construire une roue de verre CC (*fig.* 472) qu'on

Fig. 472.



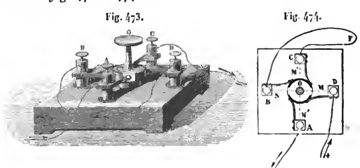
peut faire tourner par une manivelle et qui est enveloppée d'un anneau métallique continu sur le bord CC et denté sur l'autre. Deux languettes élastiques, attachées aux poupées E et B, s'appuient, la première sur les dents, la seconde sur le métal continu. Faisons passer le courant d'une pile de A dans une boussole G, de G en B, et enfin de B en E par l'intermédiaire de la roue; il sera interrompu si la languette E s'appuie sur le verre, il passera si elle presse sur une dent. Quand on fera tourner l'appareil, les communications et les interruptions se succéderont alternativement, et la quantité d'électricité totale qui passe pendant un temps donné étant

1 quand la communication est continue, se réduira à la moitié, au tiers ou au quart si l'étendue des dents conductrices occupe la moitié, le tiers ou le quart de la circonférence de la roue. Or si la rotation est rapide, la boussole G accuse une déviation constante et montre que l'intensité est précisément diminuée dans le rapport des quantités d'électricité.

Nous possédons maintenant tous les appareils nécessaires pour constater l'existence des courants et mesurer leur intensité; mais avant d'en faire usage, nous donnerons la description de deux appareils dont l'emploi revient fréquemment dans l'étude de l'électricité.

INTERRUPTEURS ET COMMUTATEURS. — Quand on veut à un moment donné soumettre ou soustraire un circuit conducteur à l'action d'un courant, on emploie l'interrupteur représenté dans les *fig.* 473 et 474.

Fig. 473. Fig. 474.



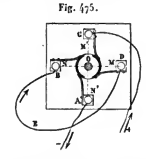
Sur un support en bois, substance peu conductrice, s'élèvent quatre poupées cylindriques en métal A, B, C, D, qui sont percées de trous horizontaux dans lesquels on engage les fils conducteurs que l'on serre au moyen de vis verticales. De chacune de ces poupées part une languette formant ressort qui vient presser un cylindre central surmonté d'un bouton O, et qu'on peut faire tourner autour de son axe vertical. Il est en ivoire, mais son contour est revêtu de deux lames métalliques opposées dont les milieux sont sur la ligne M'N', et qui ne sont séparées l'une de l'autre que par deux arcs d'ivoire situés sur un diamètre MN (*fig.* 474).

Supposons que les poupées D et A soient mises en commu-

nication, la première avec le pôle positif, la seconde avec l'extrémité négative d'une pile, et que B et C soient réunies par le conducteur CFB à travers lequel on veut faire passer le courant. Si le diamètre d'interruption est en MN, comme l'indique la figure, le courant passe de la languette fixée en D dans celle qui est portée par A, à travers le contour métallique N' du cylindre central, et il ne circule pas dans le conducteur BFC. Mais si l'on tourne de 90 degrés le bouton O, la ligne d'interruption se place suivant M'N', celle de communication en MN, alors le courant va de D en C, traverse CFB, et revient de B en A au pôle négatif.

Le même appareil sert à un autre usage : il permet de changer le sens du courant dans un conducteur et devient un commutateur. Pour cela, on joint les deux pôles aux deux poupées opposées C et A (*fig.* 475), et le conducteur BED aux deux

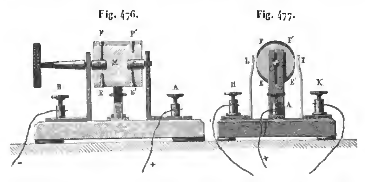
Fig. 475.



autres B et D. Si la ligne d'interruption est en M'N', le courant suit le chemin C, $\underset{\rightarrow}{\text{DEB}}$, A et marche dans le sens de la flèche EB; mais lorsqu'on mettra la ligne d'interruption en MN, le chemin parcouru sera C, $\underset{\rightarrow}{\text{BED}}$, A, dans une direction opposée à la flèche EB.

On a imaginé beaucoup d'autres appareils destinés, comme le précédent, à interrompre le courant ou à changer sa direction à un moment donné ; nous décrirons encore le suivant, qui est dû à M. Ruhmkorff et qui se retrouvera dans un grand nombre d'instruments (*fig.* 476 et 477). M est un cylindre de verre mobile autour d'un axe horizontal métallique DC qui

est interrompu en son milieu. La partie C est en commu-


Fig. 476. Fig. 477.

nication, d'abord par le support et la poupée A avec le pôle positif, ensuite avec une plaque métallique EE' appliquée par des vis sur le cylindre de verre. La partie D du même axe est, de la même manière, réunie au pôle négatif par B et à une seconde plaque FF'. De cette façon, on peut dire que EE' et FF' sont les pôles positif et négatif de la pile. La *fig.* 477 représente maintenant une élévation perpendiculaire à l'axe; on y voit les deux lames EE' et FF' faisant saillie au-dessous et au-dessus du cylindre; H et K sont deux autres poupées qui reçoivent les extrémités du conducteur et d'où partent deux languettes I et L qui se dressent à la hauteur du cylindre en verre et en regard de la partie qui est nue. Dans cette position, le courant est interrompu; mais quand, en tournant l'axe de 90 degrés, on fera communiquer EE' avec I et FF' avec L, le courant passera de I en K, circulera de K en H et reviendra de L en FF'. Au contraire, si l'on fait toucher I à FF' et L à EE', le courant ira de L en H, puis en K et I, et il aura marché dans le conducteur de H en K. C'est ainsi qu'avec beaucoup de simplicité on a à la fois, sans aucun changement des communications, un interrupteur et un commutateur.

SOIXANTE-DEUXIÈME LEÇON.

DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE ET DES PILES VOLTAÏQUES.

Force électromotrice au contact des corps hétérogènes. — Expériences de Volta. — Discussion de sa théorie. — Siége de la force électromotrice.

Couples et piles voltaïques. — Diverses formes des piles. — Pile de Volta. — A tasses. — De Cruiskanks. — De Wollaston. — De Munch. — Piles sèches.

Force électromotrice produite par la chaleur, 1° dans un seul métal; 2° à la soudure de deux métaux. — Piles thermo-électriques.

FORCE ÉLECTROMOTRICE AU CONTACT DES CORPS HÉTÉROGÈNES.

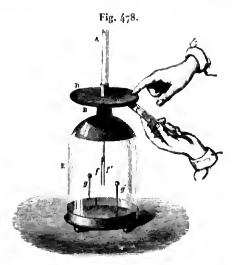
Les causes de production des courants sont nombreuses; mais deux seulement sont importantes et nous n'examinerons qu'elles.

EXPÉRIENCES DE VOLTA. — C'est en 1800 que Volta construisit le merveilleux électromoteur qui devait conduire à des phénomènes si nombreux et à des applications si diverses; il y fut amené par la découverte qu'il fit de la décomposition de l'électricité neutre au contact des corps hétérogènes et par une série de considérations préconçues où l'hypothèse avait sa large place. Les faits sont restés, mais les interprétations de l'illustre physicien ont été profondément modifiées. Nous allons résumer ses découvertes qui s'appuient sur trois expériences fondamentales.

I. Volta prend une lame métallique bien décapée, CZ (*fig.* 478), formée de deux rectangles égaux de zinc et de cuivre soudés entre eux. Tenant le zinc Z de la main gauche, il touche avec le cuivre C l'un des plateaux B de l'électromètre conden-

sateur, pendant qu'il fait communiquer l'autre avec le sol par la main droite. Il supprime ensuite ces communications, sé-

Fig. 478.



pare les deux plateaux et constate par la divergence des lames d'or que le cuivre a cédé de l'électricité au plateau B. Elle est négative.

Pour interpréter cette expérience, Volta fait trois hypothèses. 1° Il se demande en quel endroit l'électricité prend naissance, et il admet que ce n'est ni au contact de C avec le plateau B, ni à celui des doigts avec le zinc Z, mais à la soudure des deux métaux. C'est une hypothèse entièrement gratuite. 2° Il suppose que, si les deux métaux primitivement à l'état naturel étaient isolés, le fluide neutre se décomposerait à leurs points de réunion, que le zinc se recouvrirait d'une couche d'électricité positive dont la tension serait $+e$ et le cuivre d'une épaisseur égale $-e$ de fluide négatif. Quant à la cause qui détermine cette séparation, il ne l'explique pas, mais il la nomme *force électromotrice*. Elle se mesure par l'effet qu'elle produit, c'est-à-dire par la différence $2e$ des tensions électriques qu'elle établit entre les deux lames. 3° Enfin il imagine un dernier principe très-vraisemblable, et qui en effet a été vérifié depuis, c'est que la force électromotrice décompose toujours la même quantité $2e$ de fluide neutre entre les

deux corps où elle se développe, quel que soit leur état électrique initial; de sorte que si leur tension est A avant le contact, elle devient, quand il est établi, $A + e$ sur l'un, et $A - e$ sur l'autre; ce qui fait que la différence de ces tensions est constante et égale à $2e$.

II. Volta trouve une confirmation de la troisième hypothèse en faisant une seconde expérience qui consiste à retourner la lame, à tenir le cuivre à la main et à toucher avec le zinc le plateau collecteur de l'électromètre. Dans ce cas, il n'y a aucune trace d'électricité sur l'appareil, et cela doit être, car si la différence des tensions est toujours égale à $2e$, le cuivre C doit avoir o, puisqu'il touche au sol, le zinc Z $o + 2e$ ou $2e$, et le cuivre de l'électromètre $2e - 2e$ ou zéro.

III. Ce que nous venons de dire résumait pour Volta le rôle de deux métaux en contact; mais il fallait aussi fixer celui des liquides quand ils touchent ces métaux : c'est le but d'une troisième expérience. Laissant la double lame disposée comme précédemment, Volta intercale une rondelle de drap mouillé entre le zinc et le plateau collecteur et il trouve que l'électromètre se charge positivement. Alors il admet que l'électricité $2e$ qu'avait le zinc passe à travers le drap dans le plateau; puis, généralisant cette explication, il pose en principe que les liquides ne développent aucune force électromotrice dans leur contact avec les métaux et qu'ils ne servent qu'à transmettre par conductibilité simple les électricités dont ces métaux sont chargés. Toute cette théorie de Volta se résume dans les principes suivants :

1°. Les liquides sont des corps simplement conducteurs;

2°. Il existe une force électromotrice au contact de deux métaux hétérogènes;

3°. La force électromotrice établit une différence constante entre les tensions des deux métaux.

Nous avons résumé cette théorie, parce qu'une longue habitude lui a donné comme une sorte de consécration, et nous met dans l'obligation de faire oublier les idées fausses qu'elle avait légitimées, avant d'y substituer les véritables principes de l'électrochimie, obligation qui se produit tôt ou tard, mais nécessairement toutes les fois qu'on a trop précipitamment adopté quelque théorie hypothétique.

SIÉGE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE. — Toutes les erreurs que l'on a reconnues dans l'interprétation de Volta dérivent d'une cause unique, d'une faute de raisonnement que nous allons signaler tout d'abord. Quand on tient la double lame par le zinc et qu'on la met en communication par le cuivre avec l'électromètre, le plateau collecteur se charge : c'est un fait qu'on exprime en disant qu'il y a une force électromotrice. Il est évident qu'elle naît à l'un des contacts. Or il y en a trois entre lesquels il faut choisir : 1° contact des doigts avec le zinc; 2° contact à la soudure du zinc et du cuivre; 3° contact entre le cuivre de la lame et celui du plateau. Ce dernier ne peut décomposer le fluide neutre, puisqu'il n'entraîne aucune dissymétrie; mais il n'y a pas de raison pour admettre à priori que la force électromotrice est nulle entre le zinc et les doigts, et qu'elle prend naissance à la soudure zinc et cuivre. On peut tout aussi légitimement supposer que le contraire a lieu, peut-être même est-ce à tous les deux contacts à la fois que se fait la décomposition du fluide neutre. Avant tout, il faut chercher à résoudre cette question par l'expérience : Quel est le siége de la force électromotrice? Reprenons, en les variant, chacune des trois expériences de Volta.

I. Préparons une série de plaques semblables à celle de Volta, en remplaçant le cuivre par un métal quelconque que nous mettrons en contact avec l'électromètre, pendant que nous tiendrons le zinc à la main. Nous verrons que l'expérience est identique avec ces diverses plaques et que toutes chargent l'appareil de quantités à peu près égales d'électricité négative. On peut même multiplier le nombre des métaux en les soudant l'un à l'autre à la suite du zinc ou les supprimer tous en ne conservant que le zinc, sans que l'effet change sensiblement; d'où il résulte que la nature et le nombre des contacts métalliques n'ont pas d'influence sensible sur la nature et la quantité de fluide développé. Ce n'est pas là qu'est la force électromotrice.

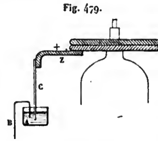
On a construit des électromètres avec un plateau de cuivre et un autre de zinc, que l'on avait vernis pour éviter l'action de l'air et qu'on réunissait en faisant toucher deux fils de cuivre soudés sur l'un et sur l'autre; ils n'ont point donné d'électricité, par conséquent les métaux soudés ne pren-

nent aucune différence de tension et constituent de simples conducteurs.

Il n'en est point de même du contact entre le zinc et les doigts. La divergence observée des lames d'or est nulle s'ils sont secs, sensible quand ils sont mouillés d'eau pure et considérable lorsqu'on les a trempés dans une solution saline ou acide. C'est donc au contact de ces doigts que le zinc prend de l'électricité négative qui se transmet au plateau et, en général, c'est entre les liquides qui se chargent positivement et les métaux qui deviennent négatifs que se développe la force électromotrice.

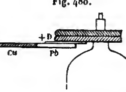
II. Volta explique la deuxième expérience en admettant que le zinc possède une tension $2e$ entre le cuivre de la lame et celui du plateau qui seraient tous deux à l'état naturel. Si cette explication était fondée, l'état des doigts qui tiennent le cuivre ne devrait avoir aucune influence sur le résultat, le fait serait général : or il ne l'est pas. L'expérience prouve qu'en mouillant les doigts avec de l'acide azotique ou de l'eau régale, ou en plongeant le cuivre dans ces liquides en communication avec le sol (*fig.* 479), on obtient sur l'électromètre une charge négative qui ne change pas quand on supprime le zinc et qu'on met le cuivre en contact direct avec le plateau. Cela est évident, si l'on admet que l'électricité négative se développe sur le cuivre par l'effet du liquide acide, et se transmet par simple conductibilité de ce cuivre au zinc et du zinc au plateau.

Fig. 479.



III. La troisième expérience de Volta consiste à tenir le cuivre à la main et à intercaler une rondelle humide entre le zinc et le plateau, ce qui charge positivement ce dernier. En variant cette expérience, on arrive encore à la mettre en contradiction avec la théorie de Volta. Prenons une double lame de cuivre et de plomb (*fig.* 480),

Fig. 480.

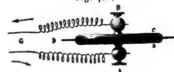


et mettons ce dernier métal en communication avec l'électromètre par l'intermédiaire d'un drap mouillé de sulfure de potassium; nous trouverons de l'électricité positive, ce qui indiquerait, dans les idées de Volta, que le plomb est positif au contact du cuivre. Mais retournons la lame, mettons le drap sur le cuivre et imprégnons-le d'acide azotique, nous constaterons la même électricité, ce qui conduirait à dire que c'est le cuivre qui est positif et non le plomb. Cette contradiction n'existe point quand on admet que le siége de la force électromotrice est entre le drap et le métal: ce drap est nécessairement positif et le métal négatif, que ce soit le cuivre ou le plomb, et tout s'explique. L'expérience doit être faite avec un électromètre à plateaux dorés.

On va retrouver les mêmes conclusions par un tout autre moyen d'études. Au lieu de mesurer les tensions des électricités par l'électromètre, qui est un instrument peu sensible et soumis à des causes perturbatrices difficiles à éliminer, on va les laisser se recombiner à travers un galvanomètre; elles donneront un courant continu, parce que la force électromotrice les reproduit à mesure qu'elles se neutralisent dans le circuit, et l'on appréciera l'intensité et le sens de cette force par la grandeur et la direction des déviations des aiguilles: les effets seront beaucoup plus intenses, tout à fait constants et parfaitement mesurables.

Prenons, par exemple, deux disques égaux, l'un de cuivre *c*, l'autre de zinc *z* (*fig.* 481), fixés à deux boutons de cuivre B et A par lesquels on les joint à un galvanomètre disposé vers G. Si l'on place entre eux un drap mouillé DD, un courant se manifeste dans le sens indiqué par les flèches.

Fig. 481.



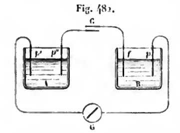
Cette expérience s'explique par la théorie de Volta : l'électricité se décomposerait entre le bouton A et le zinc *z*, la négative se porterait sur A, la positive sur *z*. De *z* celle-ci passerait au drap, puis à *c* et à B, et reviendrait en A par les fils BGA. Mais on explique également bien les faits en admettant que la force électromotrice s'exerce entre le drap mouillé DD et le zinc *z* qui deviennent, le premier positif, le second né-

gatif; le courant passe dans le circuit de DD en c et en G, et revient de G en A et en z. Ces deux explications ne diffèrent que par le point d'origine du courant.

Pour nous décider entre les deux théories, remplaçons le disque de zinc par un disque de plomb, les résultats resteront les mêmes si le drap est mouillé avec du sulfure de potassium; mais s'il est imbibé d'acide azotique, le courant aura un sens inverse. Or puisque les contacts métalliques n'ont point changé, cette inversion est inexplicable dans la théorie de Volta; elle est nécessaire, au contraire, s'il existe deux forces électromotrices inégales et opposées au contact du liquide et des deux métaux, l'une sur le plomb qui domine avec le sulfure de potassium, l'autre sur le cuivre, laquelle est la plus forte quand on emploie l'acide azotique.

On a multiplié ces expériences en les variant à l'infini; nous n'en citerons plus qu'une qui est due à M. Faraday et qui est concluante. Deux verres A et B (*fig.* 482), contenant du sulfure de potassium, sont réunis à un galvanomètre G par des fils de platine p, p' et entre eux par deux autres fils, l'un de platine p'', l'autre de fer f, terminés par deux petites plaques C. Si elles se touchent, il y a dans le circuit un contact en C entre deux métaux hétérogènes et il n'y en a pas d'autres; il devrait donc y avoir une force électromotrice en ce point C et un courant dans le conducteur; cependant le galvanomètre reste au repos. Si au contraire on interpose entre ces deux lames C un drap imbibé d'acide, on supprime tout contact métallique et l'on devrait supprimer tout courant. C'est justement l'inverse qui a lieu; on voit l'aiguille se dévier dans un sens qui indique que le fer est négatif et le liquide positif.

Fig. 482.



En résumé, Volta s'était trompé dans ses interprétations, et aux principes qu'il avait admis, principes que nous oublierons à l'avenir, il faut substituer les suivants :

1°. Il n'y a pas de différence de tension entre deux métaux hétérogènes qui se touchent;

2°. Il existe, au contact d'un liquide avec un métal, une force électromotrice qui agit toujours dans le même sens, en rendant le métal négatif et le liquide positif;

3°. La force électromotrice établit, entre un liquide et un métal qui se touchent, une différence de tension $2e$ indépendante de leur état électrique commun;

4°. Il peut arriver que cette différence soit considérable, ou faible, ou même nulle, suivant la nature du métal ou du liquide en contact.

A la vérité ces principes ne sont qu'indiqués par les expériences qui précèdent, mais nous nous réservons de les confirmer ultérieurement quand nous nous occuperons de la mesure des forces électromotrices. Pour le moment nous les admettrons à titre provisoire; nous considérerons l'action électromotrice comme un fait, et sans chercher à l'expliquer nous allons montrer comment on peut l'utiliser pour construire des piles voltaïques.

COUPLES ET PILES VOLTAÏQUES.

Imaginons deux métaux différents séparés par un liquide qui attaque l'un et soit sans action sur l'autre, par exemple deux lames de zinc et de cuivre, séparées par une couche d'acide sulfurique étendu; nous aurons ce que l'on nomme un *couple voltaïque*. On peut le figurer par le symbole suivant :

zinc	liquide	cuivre
A	$A + 2\varepsilon$	$A + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$

La force électromotrice qui agit entre le liquide et le zinc détermine entre eux une différence de tension 2ε; donc, si celui-ci est en communication par conductibilité simple avec une source quelconque m dont la tension soit A, il se mettra en équilibre avec elle, et le liquide prendra $A + 2\varepsilon$.

D'autre part, ce même liquide est en contact avec du cuivre, et par l'effet d'une seconde force électromotrice la tension de ce cuivre devra être inférieure de $2\varepsilon'$ à celle du liquide; elle sera $A + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$: donc dans l'état d'équilibre il y aura une différence $2\varepsilon - 2\varepsilon'$ entre le zinc et le cuivre, et si ce dernier métal est en contact avec un conducteur métallique n, il lui

communiquera sa tension $A + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$:

m ———	(zinc	liquide	cuivre	) ——— n
A	(A	$A + 2\varepsilon$	$A + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$)	$A + 2\varepsilon - 2\varepsilon'$

Par conséquent, toutes les fois qu'on mettra ce couple en communication avec la source m par son zinc et avec un conducteur n par son cuivre, il transmettra la tension A de cette source m à ce conducteur n, en l'augmentant de $2\varepsilon - 2\varepsilon'$: c'est la propriété essentielle d'un couple. $2\varepsilon - 2\varepsilon'$ exprime sa force électromotrice effective; nous la désignerons par $2e$.

On voit que si les deux métaux étaient identiques, $2\varepsilon - 2\varepsilon'$ serait nul et le couple inactif; lorsqu'ils seront différents, $2\varepsilon - 2\varepsilon'$ sera positif ou négatif, et aura une valeur qui dépend des métaux et du liquide. Voici cette valeur déterminée par M. Ed. Becquerel, par un procédé que nous ferons ultérieurement connaître, dans le cas où le liquide est de l'acide sulfurique étendu, où le cuivre est remplacé par du platine, et le zinc par un des métaux dont les noms suivent; celle du zinc est exprimée conventionnellement par 100.

Métal	Valeur	Métal	Valeur
Potassium	173	Cobalt	44
Zinc amalgamé	103	Bismuth	37
Zinc pur	100	Antimoine	35
Cadmium	79	Cuivre	35
Plomb	66	Argent	22
Étain	66	Mercure	31
Fer	61	Or. — Platine	0
Aluminium	51	Charbon	0
Nickel	45		

Ces nombres représentant la différence entre la force électromotrice de chaque métal et celle du platine, on obtient, en retranchant ceux qui correspondent à deux métaux quelconques, la force effective du couple qui serait constitué avec ces métaux. Elle sera positive si on combine l'un d'eux avec ceux qui le suivent, par exemple le cuivre et le platine, et négative si on l'associe avec ceux qui le précèdent (cuivre et fer); elle sera la plus grande possible avec le potassium et le platine, et en combinant le zinc et le cuivre, ce qui est le cas le plus habituel, elle aura encore une valeur considérable.

Une pile est la réunion d'un nombre n de couples disposés l'un après l'autre, de telle sorte que le cuivre de l'un d'eux touche au zinc du suivant. De cette façon, chacun est en communication métallique avec ses voisins, et puisqu'il a la propriété de transmettre les tensions en les augmentant de $2\varepsilon - 2\varepsilon' = 2e$, il faut, pour que l'équilibre électrique existe, que les tensions augmentent de $2e$ d'un zinc au suivant, c'est-à-dire comme les termes d'une progression arithmétique dont la raison est $2e$. Si l'un d'eux est à l'état naturel, tous ceux qui le suivent ou le précèdent auront les tensions $\pm 2e$, $\pm 4e, \ldots$. Par exemple, si le premier zinc touche au sol, la pile sera tout entière chargée positivement, et le dernier cuivre, qu'on nomme *pôle positif*, aura $+2ne$. Si c'est au contraire le dernier cuivre qu'on mette en communication avec le sol, le premier zinc, qui est le *pôle négatif*, aura $-2ne$,

1		2			*n*	
Zn	| liq. | Cu	Zn | liq. | Cu		...	Zn | liq. |	Cu
terre, o	$+2e$		$+4e$	$\ldots + 2(n-1)e$		$+2ne$
$-2ne$	$-2(n-1)e$		$-2(n-2)e \ldots$	$-2e$		terre, o

Toute pile, quand un de ses pôles communique avec la terre, a donc la propriété d'accumuler à l'autre extrémité des tensions $+2ne$ ou $-2ne$ et de les reproduire si elles viennent à diminuer. Par conséquent, si l'on réunit les deux pôles entre eux par un arc conducteur, chacun d'eux tend à reproduire continuellement ces tensions qui tendent continuellement à s'annuler, parce que ces électricités contraires se recombinent sous forme de courant par l'arc de communication.

Cette théorie des piles repose sur l'hypothèse de Volta, qui consiste à admettre que la différence $2e$ des tensions entre les deux pôles d'un couple est indépendante de la tension de chacun d'eux. Si elle ne l'était pas, les charges ne croîtraient pas en progression arithmétique, elles varieraient suivant une autre loi, et les pôles de la pile n'auraient pas des tensions proportionnelles au nombre n des couples. On a donc un moyen de vérifier ou d'infirmer cette hypothèse, c'est de mesurer la tension des pôles. Or M. Biot a trouvé qu'elle croît proportionnellement à n, et M. Kolhrausch a confirmé ce résultat. L'hypothèse de Volta est donc une loi physique, et il n'y a plus

rien à objecter à la théorie des piles; il n'y a plus qu'à savoir comment on les dispose.

PILE A COLONNE. — Le premier type des piles construites par Volta est représenté dans la *fig.* 483. Des disques égaux de cuivre et de zinc sont superposés alternativement, et chaque paire est séparée de la suivante par une rondelle mouillée de drap ou de carton. La colonne entière est soutenue par trois tiges de verre verticales A, B, C enchâssées dans un socle en bois D et maintenues à leur sommet par un disque percé de trois trous. Les lames de cuivre C et de zinc Z sont les *pôles;* on les met en communication, avec tous les appareils qu'on veut soumettre à leur action, par des fils métalliques que l'on appelle *réophores.*

Fig. 483.



Les effets sont faibles si les rondelles de drap sont mouillées d'eau pure; mais la tension augmente quand on les imbibe avec une dissolution saline ou acide; alors les disques de zinc s'altèrent rapidement; on doit s'empresser de démonter la pile aussitôt qu'elle a servi, et quand on veut la disposer de nouveau, il faut décaper avec soin les faces des métaux qui sont en contact. On évite ces précautions et l'on abrége le temps des opérations en faisant à l'avance souder deux à deux les disques de cuivre et de zinc.

Pour nous rendre un compte exact de la distribution des tensions dans cette pile, représentons comme précédemment

les couples successifs :

$$\text{Cu}\ \overbrace{\text{Zn}\,|\,\text{drap}\,|\,\text{Cu}}^{1}\ \ \overbrace{\text{Zn}\,|\,\text{drap}\,|\,\text{Cu}}^{2}\ \ldots\ \overbrace{\text{Zn}\ \ |\,\text{drap}\,|\,\text{Cu}}^{n}\ \ \text{Zn}$$
$$0\quad 0\quad +\quad 2e\quad 2e\quad +\quad 4e\ \ldots 2(n-1e)\quad +\quad 2ne\ \ 2ne$$

On voit que l'extrémité terminée par le zinc est le pôle positif et que celle qui est en cuivre est le pôle négatif : ce qui fait que Volta nommait *pôle zinc* le positif, et *pôle cuivre* le négatif. Cette dénomination, qui était logique dans sa théorie, n'est plus aujourd'hui qu'une cause d'erreurs, car le cuivre et le zinc extrêmes sont inutiles, puisqu'ils n'entrent dans la composition d'aucun couple ; on devrait les supprimer et on les supprime, en effet, dans la plupart des piles, de telle sorte que le pôle appelé *cuivre*, le négatif, est justement celui qui est formé par du zinc, et inversement. Pour éviter cette amphibologie et toutes les incertitudes auxquelles elle donne lieu, nous supprimerons ces dénominations ; et quand nous voudrons reconnaître dans une pile quelconque le pôle positif et le pôle négatif, nous considérerons un couple en particulier,

$$-\text{A}\ \ldots\ \overbrace{\text{Zn}\,|\,\text{liquide}\,|\,\text{Cu}}\ \ldots\ +\text{B}$$
$$0\qquad\qquad +2e$$

A partir du liquide, le pôle négatif $-$A sera tourné du côté du zinc, et le positif $+$B du côté du cuivre. Ainsi, dans la pile à colonne, un couple ZDC′ (*fig.* 484) a sa force électromotrice maximum en X′Y′ ; le pôle négatif est en bas du côté du zinc, et le positif est en haut vers le cuivre.

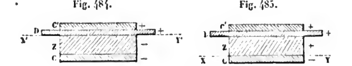


Fig. 484. Fig. 485.

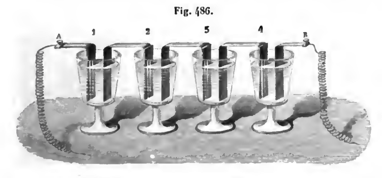
On a pu remarquer que, d'après Volta, le zinc serait positif et le cuivre négatif, tandis que nous avons montré que le zinc prend l'électricité négative et le liquide la positive. Il paraît en résulter une contradiction ; mais elle n'est qu'apparente. Elle tient à ce que Volta supposait le siége de la force électromotrice placé en XY (*fig.* 485) au contact des deux métaux,

tandis qu'il est situé en X'Y' (*fig.* 484). Dans les deux cas, le premier cuivre C est négatif et le second C' positif, il n'y a rien de changé aux tensions de deux couples successifs.

La pile à colonne a des inconvénients graves : sous l'effort des pressions exercées par les parties supérieures, les liquides coulent le long des disques et abandonnent les rondelles mouillées, ce qui reste attaque le zinc et le transforme en sels nouveaux; il en résulte que la pile se dessèche, qu'elle devient moins conductrice et moins active et que ses effets, d'abord énergiques, diminuent rapidement, jusqu'à devenir insensibles.

PILE A TASSES. — On a réussi à diminuer ces imperfections de la pile primitive en modifiant sa construction. Volta commença par disposer les couples sur un support horizontal, ce qui évitait les effets de la compression. Il remédia ensuite à l'altération rapide des liquides, en construisant la *pile à tasses* (*fig.* 486). Les disques sont remplacés par des lames rectangulaires recourbées sous la forme d'un U renversé, dont la

Fig. 486.



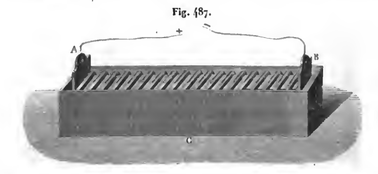
branche antérieure est en cuivre et la postérieure en zinc. Elles plongent dans des verres remplis d'eau acidulée, entre lesquelles elles établissent une série de ponts. Il est bien évident que l'on trouve ici les mêmes alternatives de zinc, de liquide et de cuivre que dans la pile à colonne, répétées autant de fois qu'il y a de couples. Mais il y a deux différences essentielles : la première est que les draps, qui contenaient peu de liquide s'altérant rapidement, sont remplacés par une masse considérable d'eau acidulée dont la composition chimique

varie très-lentement et qui conserve à la pile une intensité presque constante pendant longtemps; la seconde consiste en ce que les divers éléments peuvent être exactement isolés. A cet effet, on vernit à la gomme laque les pieds des verres et on les range en série sur des rayons disposés comme ceux d'une bibliothèque; telle est la pile de M. Gassiot, dont nous aurons bientôt l'occasion de parler.

PILES DE CRUISKANKS ET DE WOLLASTON. — Toutes les personnes qui ont employé ces appareils savent combien il faut de temps pour disposer une pile dont le nombre d'éléments est considérable. C'est un inconvénient que l'on a fait disparaître en fixant invariablement les métaux entre eux, de telle sorte qu'il n'y ait plus qu'à amorcer l'instrument en remplissant d'eau acidulée l'intervalle compris entre le cuivre et le zinc de chaque couple; c'est le principe des piles de Cruiskanks et de Wollaston.

Dans la première (*fig.* 487), les plaques zinc et cuivre ont la forme carrée; elles sont implantées et mastiquées verticale-

Fig. 487.



ment dans une auge horizontale de bois; elles laissent entre elles des vides qui représentent la place occupée par les draps dans la pile à colonne. Il suffit de remplir ces vides avec de l'eau acidulée pour amorcer la pile et de les vider pour qu'elle cesse d'agir.

La pile de Wollaston dérive naturellement de la pile à tasses. Que l'on suppose tous les éléments de celle-ci (*fig.* 486) fixés à une traverse horizontale, on pourra les soulever tous à la fois et les soustraire ainsi à l'action du liquide ou bien les plonger

en même temps dans les verres, ce qui mettra à l'instant la pile en activité pendant le temps strictement nécessaire pour faire l'expérience que l'on aura en vue : c'est là ce que fit Wollaston. Mais comme il avait remarqué que les courants d'une pile sont d'autant plus énergiques que les surfaces immergées sont plus grandes et plus rapprochées, il prit des plaques de zinc ZZ de plusieurs décimètres carrés, et recourba les feuilles de cuivre C'C' autour d'elles, de manière à envelopper leurs deux côtés (*fig.* 488). Les verres sont remplacés par de grands bocaux plats placés en série sur une planche; deux montants échancrés en crémaillère servent à supporter la traverse AB (*fig.* 489) à des

Fig. 488.

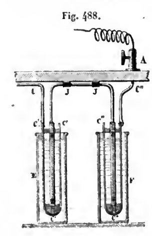
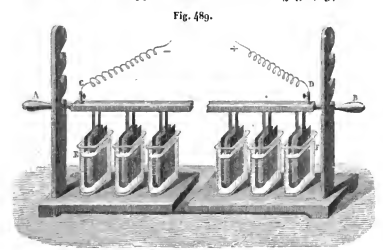


Fig. 489.



hauteurs diverses, suivant qu'on veut plonger plus ou moins les couples ou les maintenir hors du liquide.

On peut dire que la pile de Wollaston, sans altérer le type de la pile primitive, résume tous les perfectionnements dont il était susceptible.

Quand on veut étudier les effets de tension aux extrémités des piles, il est indispensable d'isoler les couples avec le plus grand soin. Mais lorsqu'elles ne doivent servir qu'à produire des courants à travers des circuits métalliques, cette condition est inutile. Le plus souvent on ne s'en préoccupe pas, et cela tient à ce que les métaux sont incomparablement plus conducteurs que les autres corps. Ainsi, la pile à colonne est toujours mouillée par le liquide qui coule le long de sa surface extérieure et qui établit entre les pôles une communication continue; cependant il ne paraît pas qu'elle fonctionne plus mal quand cette communication existe, que lorsqu'elle est évitée avec plus de soin. On pourrait même la plonger toute entière dans un vase rempli de liquide sans qu'elle cessât de donner des courants énergiques à travers des circuits métalliques. MM. Becquerel, Faraday et Munch ont profité de cette remarque pour construire des piles à une seule auge. Nous allons décrire celle de Munch.

PILE DE MUNCH. — Concevons une série de lames ZC (*fig.* 490),

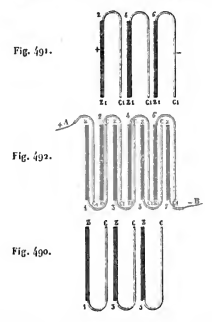


Fig. 491.

Fig. 492.

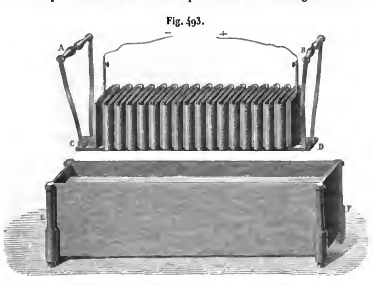
Fig. 490.

formées de plaques rectangulaires de zinc et de cuivre, placées

dans une auge commune remplie d'eau acidulée. Les soudures numérotées 1, 3, 5,..., sont verticales et alignées du même côté. Il est évident que si l'on établit par un arc métallique une communication entre les lames extrêmes de cet appareil, il fonctionnera comme une pile de Volta, puisqu'on y retrouve les mêmes alternatives de zinc, de cuivre et de liquide, avec cette seule circonstance, qui n'a point d'influence, qu'il est plongé dans une auge unique. Imaginons ensuite une seconde pile toute semblable formée des éléments Z_1, C_1 (*fig.* 491), dont les soudures 2, 4, 6, sont placées du côté opposé, et qui fonctionnera comme la première. Enfin engageons les éléments de ces deux piles les uns dans les autres (*fig* 492); ils agiront après cet enchevêtrement comme ils le faisaient séparément, et leur ensemble donnera une pile unique plus forte. Il ne reste plus qu'à intercaler une lame de cuivre + A entre les deux zincs qui sont à l'extrémité de gauche, et une lame de zinc — B entre les deux cuivres qui sont à l'extrémité de droite, lesquelles seront les pôles positif et négatif de la pile totale.

On sépare les lames voisines par des cales de liége et on les

Fig. 493.



fixe au moyen de règles en bois sillonnées de traits de scie

dans lesquels elles sont engagées. Le tout repose sur une planche CD (*fig.* 493), munie de deux poignées A et B qui servent à plonger l'appareil dans l'auge ou à l'en retirer.

PILES A HÉLICE. — Il nous reste à dire que si l'on a besoin de piles à plus large surface, on peut enrouler en hélice, autour d'un axe en bois, deux lames de cuivre et de zinc que l'on sépare par un tissu d'osier; on les plonge ensuite dans des tonneaux pleins d'eau acidulée; alors elles réalisent un couple dont rien ne limite l'étendue, et si l'on en réunit 25 de 6 mètres carrés, on obtient des effets fort intenses.

De toutes les piles que nous venons de décrire, deux seulement offrent des tensions sensibles à leurs pôles, parce qu'elles sont les seules dont on puisse isoler les éléments : c'est la pile à colonne et la pile à tasses; elles font diverger les lames d'un électroscope, et la tension aux pôles est proportionnelle au nombre des couples. Celle qui a été construite par M. Gassiot est composée de 3500 éléments parfaitement isolés, et quand on rapproche très-près l'un de l'autre deux conducteurs fixés à ses pôles, ils produisent une série continue d'étincelles, et ils chargent fortement une bouteille de Leyde quand on les fait communiquer avec les armatures opposées. Une telle pile produit donc tous les effets d'une machine de Nairne, avec deux particularités essentielles à noter : la première est qu'elle donne des étincelles très-petites, c'est-à-dire des tensions très-faibles; la seconde qu'elle charge instantanément la bouteille de Leyde, tandis qu'une machine électrique ne le fait qu'en un temps assez long : cela veut dire qu'elle reproduit avec une extrême rapidité l'électricité qu'on enlève à ses pôles. On arrive à la même conclusion quand on compare les intensités des courants fournis par une machine de Nairne et par une pile; dans les deux cas, ces intensités mesurent la quantité d'électricité qui circule dans le circuit et, par suite, celle que fournit l'électromoteur. Or l'expérience prouve que le courant des machines est à peine sensible et que celui des piles est très-fort. En résumé, les machines fournissent peu d'électricité dont la tension limite est considérable, et les piles en produisent beaucoup dont la tension limite est faible. Nous reviendrons sur ce sujet.

PILES SÈCHES. — Il est un autre genre d'électromoteurs, les piles sèches, qui participent à la fois des piles ordinaires par la faiblesse de leur tension et de la machine électrique par la lenteur avec laquelle elles réparent leurs pertes. Ce sont des piles à colonne dans lesquelles un des métaux est remplacé par du papier. Voici comment on les construit d'après Zamboni, qui les a spécialement étudiées.

On choisit des feuilles de papier un peu fort, on applique sur une de leurs faces une lame mince d'étain et l'on peint l'autre avec du bioxyde de manganèse délayé dans du lait ou dans une eau gommeuse. Quand elles sont sèches, on en superpose plusieurs en mettant les faces hétérogènes en contact, et on les débite à l'emporte-pièce en petits paquets de rondelles égales que l'on empile au nombre de douze à quinze cents. On arme les deux extrémités de disques de cuivre; on comprime le paquet; on le maintient par des cordonnets de soie qui lient les armatures opposées, et l'on préserve le tout de l'action de l'air, en enduisant la pile d'une couche de soufre ou de gomme laque fondus.

Le couple constituant de cette pile peut se représenter comme il suit :

$$-A \ldots \overbrace{\underset{-e}{\text{Étain}} \mid \underset{+e}{\text{Bioxyde de manganèse}}, \underset{+e}{\text{papier}}} \ldots +B$$

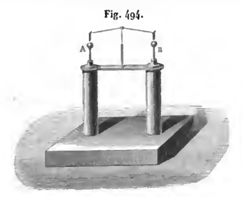
La force électromotrice se développe au point où se produit une action chimique entre l'étain qui s'oxyde et devient négatif, et le bioxyde qui cède de l'oxygène et devient positif. Le papier sert de conducteur entre un couple et le suivant; il remplace le cuivre des piles ordinaires, pendant que le bioxyde remplace l'eau acidulée. Delezenne a constaté que ces piles ne fonctionnent qu'autant que le papier est un peu humide, qu'elles deviennent inactives au bout de plusieurs années et qu'alors les surfaces en contact de l'étain et du bioxyde se sont altérées notablement par l'effet prolongé de l'action chimique.

Les piles sèches manifestent aux pôles une tension assez grande, proportionnelle au nombre des rondelles; mais elles ne produisent qu'un courant insignifiant, parce qu'étant peu conductrices elles reproduisent lentement l'électricité qui se

dépense dans le circuit. Cependant, en les construisant avec de grandes feuilles de papier, Delezenne a augmenté leur conductibilité et l'intensité de leurs courants.

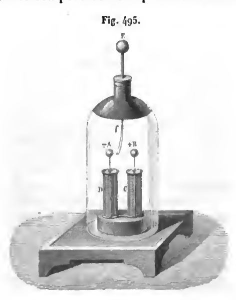
On les a utilisées pour construire deux appareils assez curieux. L'un d'eux (*fig.* 494) est destiné à manifester la tension

Fig. 494.



des pôles; il se compose de deux piles verticales réunies à la

Fig. 495.



base et présentant à leurs sommets deux pôles de nom con-

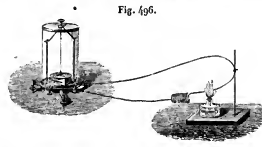
traire A et B; ces pôles attirent une aiguille de gomme laque terminée à chaque bout par une lame de clinquant qui les vient toucher à chaque demi-révolution, et qui est repoussée ensuite : il en résulte un mouvement de rotation qui se continue pendant plusieurs années. L'autre de ces appareils est l'électroscope de Bonenberger (*fig.* 495); il se compose encore de deux piles C et D réunies par leur base et terminées à leur sommet par deux boutons A et B également et inversement chargés, de sorte qu'une lame d'or *f* placée à égale distance de ces deux pôles reste immobile, sollicitée par deux attractions contraires. Si l'on approche de E un corps chargé positivement, la lame *f* devient positive et elle est attirée par — A; elle se portera, au contraire, sur + B si le corps approché est chargé négativement.

FORCE ÉLECTROMOTRICE PRODUITE PAR LA CHALEUR.

Lorsqu'on réunit par un fil conducteur homogène les deux extrémités d'un galvanomètre, il n'y a aucune raison pour qu'un courant s'établisse dans un sens plutôt que dans l'autre, aussi ne s'en produit-il aucun. La même symétrie existera encore et l'aiguille ne sera point déviée si l'on chauffe le milieu du fil conducteur et même un point quelconque de sa longueur s'il est suffisamment éloigné de ses extrémités; mais lorsqu'il existera quelque différence dans l'état du fil à droite et à gauche de la partie chauffée, il pourra se produire une force électromotrice et un courant; c'est en effet ce qui a lieu le plus souvent.

Ainsi, M. Becquerel a fait voir (*fig.* 496) qu'en prenant un

Fig. 496.



fil bien homogène dans lequel on a fait plusieurs nœuds su-

perposés ou que l'on a contourné en spirale dans une partie de sa longueur, et l'échauffant en un point voisin, on obtient un courant allant, en général, de la partie chaude à la spirale ou au nœud, et quelquefois en sens inverse, comme cela arrive avec le zinc, l'étain et le cuivre. Ainsi encore, Seebeck a remarqué, dans des circuits de bismuth chauffés par un point, l'existence de courants analogues dont les directions changent quand l'échauffement a lieu d'un côté ou de l'autre de certains points neutres, et M. Matteucci a prouvé que ces courants et ces inversions étaient liés à des particularités de la cristallisation.

M. Magnus a reconnu qu'il n'y a point de courant quand on chauffe le point de réunion de deux fils de même nature et au même état physique, quand ils ont des diamètres inégaux ou des surfaces diversement polies, ce qui exclut l'idée que le phénomène soit produit par une transmission inégale de la chaleur dans les deux sens; mais il a prouvé que toute différence dans la dureté du fil à droite et à gauche du point chauffé détermine infailliblement la naissance d'un courant, sans changer la conductibilité calorifique. Ce courant traversait le lieu d'échauffement, de la partie recuite à la partie écrouie, dans des fils de

laiton, argent, cuivre, platine, or,

et il donnait des déviations galvanométriques égales à

55°, 46°, 25°, 5°, 2°;

il marchait, au contraire, de la partie écrouie à la partie recuite dans les métaux

argentan, zinc, étain, fer, plomb,

et produisait des déviations égales à

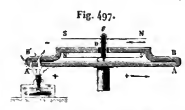
34°, 32°, 30°, 4°, 0.

M. Becquerel a découvert encore que l'on obtient des courants quand on joint au galvanomètre deux fils identiques, l'un chaud et l'autre froid, et qu'on ferme le circuit en les faisant toucher. Ces courants ont des sens différents, suivant les divers métaux, et quelquefois leur direction change avec la différence des températures.

Ces faits, et beaucoup d'autres que nous ne citons pas, n'ont point été expliqués; on ne peut que les constater et les résumer, en disant qu'une dissymétrie de structure à droite et à gauche d'un point que l'on chauffe fait naître une force électromotrice dans un circuit composé d'un même métal.

J'arrive à des phénomènes plus importants qui ont été découverts par Seebeck. Prenons deux lames de bismuth et d'antimoine BB′, AA′ (*fig.* 497) soudées à leurs extrémités, de manière à former un circuit complet. Un système de deux aiguilles astatiques NS, N′S′, posé sur un pivot C*e*, occupe dans ce circuit la même position que dans un galvanomètre; il n'est point dévié si les températures sont égales aux deux extrémités AB, A′B′. Mais lorsqu'on vient à chauffer A′B′, les aiguilles se déplacent et accusent un courant qui va de A′ en A et de B en B′, et qui change de sens si c'est la soudure AB qui est échauffée.

Fig. 497.



Il y a donc dans ces conditions de température une force électromotrice dans le circuit, mais on ne sait pas où elle se développe : elle peut être à la partie chaude ou à la partie froide; il pourrait même se faire qu'il y en eût deux, une à chaque soudure, égales entre elles et détruisant leurs effets si les températures sont égales, mais variant avec les températures, et engendrant un courant dans le sens de la plus grande quand les soudures sont inégalement échauffées. Généralement, on admet qu'il y en a une seule, qu'elle est à la partie chauffée, et qu'elle rend l'antimoine positif et le bismuth négatif; mais c'est une pure hypothèse.

Tous les métaux en contact produisent les mêmes actions avec des différences d'intensité. On a cherché à les classer par ordre de pouvoir électromoteur. A cet effet, M. Becquerel forme avec divers métaux soudés une chaîne dont il fixe les bouts aux extrémités du galvanomètre et qu'il maintient à zéro, à l'exception de l'une des soudures qu'il chauffe à 20 degrés; il mesure l'intensité et le sens du courant. Comme la conductibilité totale change peu quand on répète l'expérience sur les diverses soudures, la force électromotrice est, dans chaque

cas, proportionnelle à cette intensité. C'est ainsi que M. Becquerel a dressé le tableau suivant, où chaque métal est négatif quand il est combiné avec tous ceux qui le suivent, et positif avec ceux qui le précèdent, la force électromotrice étant d'autant plus grande que les corps considérés sont plus distants dans la liste :

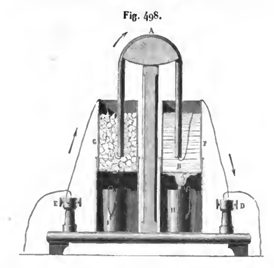
Bismuth,	Argent,	Or,
Nickel,	Étain,	Zinc,
Platine,	Plomb,	Fer,
Palladium,	Rhodium,	Arsenic,
Cobalt,	Laiton,	Antimoine.
Manganèse,	Cuivre,	

Généralement, quand l'excès de température d'une soudure sur toutes les autres reste très-petit, l'intensité du courant est proportionnelle à cet excès; mais quand il devient de plus en plus grand, cette loi ne se soutient pas : il y a même des cas où le courant, après avoir augmenté, diminue, devient nul et change de signe à une température variable avec les corps considérés, elle est :

Entre l'argent	et le	zinc	égale à	225°,
»	l'or	»	zinc	»	150°,
»	fer	»	cuivre	»	rouge sombre.

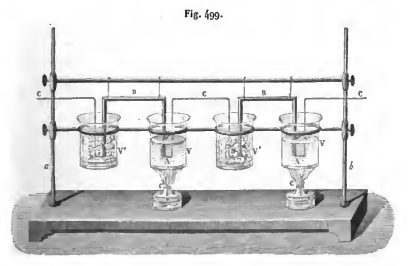
On s'est appuyé sur ces faits pour construire des piles *thermo-électriques*. La *fig.* 498 représente un des couples. BAC est un cylindre de bismuth recourbé, aux extrémités C et B duquel sont soudés deux fils de cuivre; les deux soudures sont plongées dans des vases dont l'un F est rempli d'eau échauffée par une lampe H, et dont l'autre contient de la glace. Il est clair que l'ensemble des forces électromotrices agira pour rendre le fil BD positif et le fil CE négatif, ou pour produire un courant dans le sens indiqué par les flèches, si D et E sont en communication par un conducteur. En réunissant un nombre quelconque de couples semblables orientés dans le même sens, on aura une pile thermo-électrique dans laquelle les tensions devront varier en progression arithmétique d'un couple au suivant si elle est isolée, et qui produira des courants lorsque l'on réunira ses pôles par un circuit fermé.

Fig. 498.



La *fig.* 499 représente une de ces piles, disposée pour la mesure des tensions. Nobili imagina de lui donner une forme

Fig. 499.



beaucoup plus commode. Comme les soudures de rang pair ou impair doivent être toutes refroidies ou réchauffées, il a imaginé de disposer les soudures paires d'un côté et les sou-

dures de rang impair de l'autre (*fig.* 500), de cette façon on met la pile en activité rien qu'en chauffant l'une de ses faces, et le courant change de sens si l'on change le côté qu'on

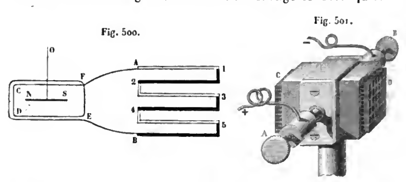


Fig. 500.

Fig. 501.

échauffe. Enfin on sait comment Nobili, en diminuant l'étendue des éléments et en multipliant leur nombre (*fig.* 501), a réussi à donner à ces piles une sensibilité assez grande pour les employer à l'étude du rayonnement calorifique.

SOIXANTE-TROISIÈME LEÇON.

SUR LE TRAVAIL ÉLECTROCHIMIQUE EXTÉRIEUR.

Électrolysation des composés binaires, — des sels. — Actions secondaires. — Cas des mélanges. — Composés des métalloïdes. — Voltamètre. — Quantités d'électricité fournie par les machines électriques. — Loi de Faraday.

Toute tentative que nous ferions aujourd'hui pour imaginer la cause des forces électromotrices serait prématurée : avant de faire des théories, il faut avoir étudié complétement les phénomènes. Nous allons donc laisser provisoirement de côté toute considération hypothétique, et chercher expérimentalement quelles sont les propriétés des courants.

On va voir qu'un courant détermine des actions chimiques particulières régies par des lois très-simples. Ce sujet se divise naturellement en deux parties, suivant qu'on veut étudier les effets chimiques dans le circuit extérieur aux pôles, ou dans les couples de la pile, c'est-à-dire le travail chimique extérieur ou intérieur.

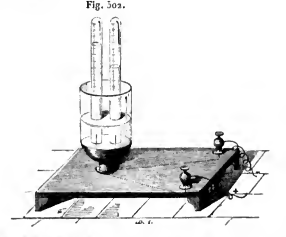
TRAVAIL ÉLECTROCHIMIQUE EXTÉRIEUR.

Quand on joint aux deux pôles de la pile deux fils conducteurs quelconques, et qu'on réunit leurs extrémités libres par un composé chimique liquide capable d'être traversé par le courant, il est décomposé. Les deux conducteurs se nomment *électrodes*, le composé s'appelle *électrolyte*, et l'acte de la décomposition sous l'influence du courant reçoit le nom d'*électrolyse* ou d'*électrolysation*.

On fait les expériences avec l'appareil suivant (*fig.* 502) qui se compose, 1° d'une cloche renversée au fond de laquelle on a coulé du mastic isolant; 2° de deux électrodes en platine qui traversent ce mastic; 3° de deux éprouvettes graduées

destinées à recueillir les gaz. Voici ce que l'on observe avec divers composés.

Fig. 502.



I. **COMPOSÉS BINAIRES.** — Quand on verse de l'eau dans la cloche et qu'on fait passer le courant, on voit se dégager de l'oxygène à l'électrode positive, et un volume double d'hydrogène au pôle négatif, c'est-à-dire que les éléments de l'eau sont séparés et transportés aux deux pôles. La décomposition est très-lente si l'eau est pure, parce qu'étant très-peu conductrice elle ne laisse passer qu'un courant très-faible; mais l'action s'active si l'on ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique qui augmentent la conductibilité. Cette expérience capitale a été faite en 1800 par Carlisle et Nicholson.

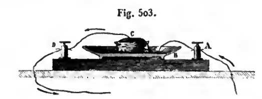
II. Les dissolutions concentrées des acides bromhydrique, chlorhydrique et iodhydrique se séparent en hydrogène qui se porte au pôle négatif, et en brome, chlore ou iode qui apparaissent sur le fil positif.

III. Les chlorures, bromures, iodures, et en général les composés d'un métalloïde et d'un métal, dégagent ce métalloïde au pôle positif, et laissent déposer le métal sur l'électrode négative. L'expérience peut se faire soit en les fondant dans un creuset, auquel cas la plupart d'entre eux deviennent conducteurs, soit en les dissolvant dans l'eau.

IV. Les oxydes se comportent d'une manière analogue. Davy soumit à l'action d'une pile de 250 couples un fragment

de potasse caustique; il vit à l'électrode positive se dégager une quantité considérable d'oxygène pur, et au fil négatif, se rassembler de petits globules brillants d'un métal nouveau qu'il appela *potassium*. La même expérience fut répétée avec la soude et donna le sodium. Mais comme ces métaux brûlent en décomposant, au moment où ils se forment, l'eau qui mouille ordinairement la potasse, il vaut mieux, comme le fit Seebeck, creuser à la surface du fragment une cavité C qu'on remplit de mercure et y plonger l'électrode négative (*fig.* 503).

Fig. 503.



Au bout de quelque temps, ce mercure prend l'aspect d'un alliage et il laisse le potassium pour résidu, quand on le distille dans l'huile de naphte.

La potasse, la soude et la litharge fondues par la chaleur se décomposent de la même manière, et, en général, on peut dire que tous les oxydes seraient réduits par l'électricité s'ils pouvaient tous être rendus conducteurs.

SELS. — Les sels à acides minéraux offrent un dernier exemple de ces décompositions simples. On voit, comme précédemment, le métal se déposer sur l'électrode négative, pendant que l'acide et l'oxygène arrivent au pôle positif. C'est ainsi que le sulfate de cuivre SO^3CuO donne Cu au pôle — et SO^3, O au pôle +.

Pour expliquer cette décomposition, nous admettrons, avec quelques chimistes, que les sels en général, et en particulier SO^3CuO, sont formés par la combinaison binaire d'un métal Cu et d'un radical composé de l'acide et de l'oxygène (SO^3, $O = SO^4$), et que le courant ne fait rien autre chose que de séparer ces éléments. L'hydrogène étant un véritable métal, l'eau aiguisée d'acide sulfurique pourra être considérée comme un sulfate d'eau SO^4H, et les acides bromhydrique, chlorhydrique et iod-

hydrique comme des composés dont la base est métallique; alors la loi de toutes les décompositions précédentes sera celle-ci : « Les composés binaires formés par un métal uni à un radical, c'est-à-dire à un métalloïde ou à un acide suroxygéné, se détruisent par le passage d'un courant; le radical se porte au pôle positif, et le métal au pôle négatif. »

ACTIONS SECONDAIRES. — Les décompositions ne sont point toujours aussi simples que nous venons de le dire; elles se compliquent quelquefois d'actions secondaires qui modifient les résultats généraux, mais qu'il est facile d'expliquer. Si, par exemple, l'électrode positive est oxydable, elle est attaquée par l'oxygène et l'acide qui se portent à sa surface, et au bout de peu de temps elle se dissout; c'est ce qui arrive encore, même quand elle est en platine, lorsqu'on électrolyse un chlorure ou de l'acide chlorhydrique, auquel cas cette électrode forme un chlorure soluble.

Il résulte de là que si l'on électrolyse du sulfate de cuivre avec une électrode positive en cuivre, elle sera dissoute par la réaction de l'acide sulfurique et de l'oxygène, et reconstituera avec ces éléments et sa propre substance une quantité de sel précisément égale à celle qui est détruite par l'action du courant; de sorte que la liqueur conservera toujours la même composition, et que tout se réduira à un transport de métal du pôle positif au pôle négatif. La même chose aura lieu, en général, avec un sel quelconque, lorsque l'électrode positive sera faite du même métal que celui qui entre dans la solution. On utilise cette action secondaire dans la galvanoplastie, ainsi que pour la dorure et l'argenture électriques, afin de conserver à la dissolution une composition constante.

Dans d'autres circonstances, c'est la dissolution elle-même qui se modifie par la réaction que les éléments mis en liberté exercent sur elle. Un sel de protoxyde de fer jaunit autour de l'électrode positive, parce que l'oxygène qui se dégage le suroxyde; inversement, un sel de peroxyde se décolore au pôle négatif, parce que le fer, au lieu de se déposer, se dissout dans la solution qu'il ramène à un degré d'oxydation moindre. L'eau oxygénée s'électrolyse, mais une portion de son hydrogène est absorbée dans le liquide qui redevient de l'eau ordinaire.

La plus importante de ces réactions se produit dans l'électrolysation des sels appartenant aux métaux des deux premières sections. L'acide et l'oxygène doivent se porter et se portent en effet au pôle positif, et le métal devrait se déposer sur l'électrode négative; mais comme il décompose l'eau, il se transforme en oxyde et dégage de l'hydrogène. On fait ordinairement l'expérience dans un tube en U (*fig.* 504) rempli de sulfate de soude coloré avec du sirop de violettes, et l'on voit au bout de peu de temps la teinture rougir en A et verdir en B, ce qui indique la présence de l'acide et de l'alcali à ces deux extrémités. Si l'on employait le sulfate d'alumine ou celui de magnésie, on verrait les deux oxydes se rassembler en gelée autour du fil B.

Fig. 504.



On doit à Nobili et à M. Becquerel une application fondée sur cette espèce de réaction. Quand on décompose au moyen de la pile une solution de protoxyde de plomb dans la potasse, on obtient du plomb métallique au pôle négatif et de l'oxygène au pôle positif; mais cet oxygène ne se dégage pas, il est absorbé par la liqueur et forme du bioxyde de plomb insoluble qui s'étale en couche mince sur l'électrode, en prenant les teintes des anneaux colorés. Il en résulte que si cette électrode est un métal poli, elle prend une coloration très-vive, qui change avec l'épaisseur du dépôt, et par conséquent avec le temps plus ou moins long de l'action.

L'électrolyse des sels ammoniacaux a conduit Gay-Lussac et Thenard à la véritable théorie de ces composés. On creuse dans un fragment de chlorhydrate d'ammoniaque un peu humide une cavité qu'on remplit de mercure; on opère comme le faisait Seebeck avec la potasse (*fig.* 503), et l'on obtient le même résultat. Le mercure s'épaissit, gonfle considérablement et prend tout l'aspect d'un amalgame, en même temps qu'il se dégage du chlore au pôle positif. Pour faire rentrer cette action singulière dans les lois de l'électrolysation, on a été conduit à admettre que le sel employé (AzH^3HCl) est un chlo-

rure (AzH^4Cl) d'un métal particulier (AzH^4) qu'on a nommé *ammonium*. Ce chlorure serait décomposé comme le sont tous les autres et formerait avec l'électrode négative, qui est en mercure, un amalgame peu stable et qui bientôt se décompose. Mais si l'on opère dans une dissolution aqueuse, ce métal décompose l'eau, forme un oxyde ($AzH^4O = AzH^3, HO$) et dégage de l'hydrogène; c'est donc par une action secondaire que, dans ce cas, le chlorhydrate d'ammoniaque se dédouble en chlore au pôle positif, et en ammoniaque et hydrogène au pôle négatif.

Tous ces faits sont de nature à jeter des doutes sur l'explication que nous avons donnée de l'électrolyse des solutions salines. On pourrait supposer que c'est l'eau qui est décomposée, car si cela était, elle donnerait de l'oxygène au pôle positif, ce qui a lieu, et au pôle opposé de l'hydrogène naissant qui réagirait sur le sel (SO^4Cu) et réduirait le métal. Pour être renseignés sur ce point, commençons par étudier en général l'électrolyse des mélanges.

CAS DES MÉLANGES. — Quand on soumet à l'action du courant un mélange de deux solutions salines, on trouve que l'un des sels est décomposé, quelquefois exclusivement, et presque toujours plus abondamment que l'autre. Ainsi M. Becquerel ayant fait dissoudre dans 100 équivalents d'eau un équivalent d'azotate d'argent et un autre équivalent d'azotate de cuivre, vit que l'argent seul se déposait au pôle négatif, mais qu'il s'y ajoutait ensuite une proportion croissante de cuivre quand on augmentait progressivement la quantité d'azotate de ce métal. Or, comme l'azotate d'argent est plus conducteur que celui de cuivre, on peut admettre que c'est lui qui transmet le courant et qui en subit l'action de préférence. C'est encore la conclusion à laquelle on arrive quand on examine, comme l'a fait M. Matteucci, la solution d'acide chlorhydrique : l'acide seul est décomposé quand elle est concentrée, et l'eau n'est électrolysée que lorsqu'elle domine beaucoup.

De là il est facile de prévoir que généralement l'eau ne jouera aucun rôle dans l'électrolysation des solutions salines, qu'elle ne sera décomposée que si elle est en très-grande proportion ou bien si elle est mêlée à un acide. C'est en effet ainsi

que les choses se passent. M. d'Almeïda a pris deux flacons voisins, réunis, à leur partie supérieure, par un canal étroit; il les a remplis d'une même solution de sulfate de cuivre ou d'un autre sel quelconque, et il a fait communiquer ces deux vases avec les deux pôles. Quand la solution était neutre et maintenue neutre pendant toute l'opération, chacun des vases perdait par la décomposition la même quantité de sel; cela prouve que ce sel est électrolysé exclusivement, car si l'eau l'était, elle dégagerait au pôle négatif une certaine quantité d'hydrogène qui, par réaction, réduirait du métal, et en définitive la solution s'appauvrirait plus dans le vase négatif que dans l'autre. Mais si le liquide est acide dans le verre positif, l'eau acidulée s'électrolyse en même temps que le sel, la réaction se fait et la perte du métal est plus grande au pôle négatif. Or il est clair que, dans le cas où la solution est primitivement neutre, elle ne tarde pas à contenir au voisinage du pôle positif un excès d'acide produit par l'électrolysation, par conséquent l'eau ne tarde pas à jouer son rôle, et l'on voit la liqueur se décolorer au pôle négatif. Ce fait était signalé depuis longtemps par M. Pouillet.

COMPOSÉS DES MÉTALLOIDES. — Nous n'avons étudié jusqu'à présent que les composés binaires ou ternaires à base métallique; ceux qui proviennent de la combinaison des métalloïdes entre eux sont loin d'éprouver des effets aussi simples. On en trouve d'abord un grand nombre qui ne sont point conducteurs et qui ne peuvent être électrolysés, puisqu'ils ne laissent pas passer le courant; ce sont les chlorures de soufre et de phosphore, le sulfure de carbone, l'acide sulfurique anhydre, etc. Quelques autres peuvent transmettre le courant quand on les mêle avec des dissolvants conducteurs; mais dans ce cas ce sont vraisemblablement ces dissolvants qui se décomposent en produisant des actions secondaires. Par exemple, l'ammoniaque concentrée, saturée de sulfate d'ammoniaque, donne de l'hydrogène au pôle négatif, et au fil positif, ou de l'azote pur ou un mélange d'oxygène, d'azote et d'oxydes azotés. Tout cela s'explique en supposant que le sulfate ammoniacal est décomposé, et que l'oxygène naissant réagit sur l'ammoniaque au pôle positif.

On peut de même expliquer l'électrolyse de l'acide azotique par la décomposition de l'hydrate AzO^6H ; car l'hydrogène naissant au pôle négatif réagirait sur l'acide et donnerait lieu à un mélange d'azote, de bioxyde d'azote et d'hydrogène, en proportions variables avec les circonstances de l'expérience; c'est en effet ce qui a lieu. La même observation s'applique aux décompositions des acides sulfurique et phosphorique, et l'on peut admettre, avec M. Faraday, qu'elles sont dues à des phénomènes secondaires. Au reste, puisque l'électrolyse des composés formés par des métalloïdes n'offre aucune régularité, elle ne peut résulter que d'actions complexes, et ce n'est pas à ces cas singuliers qu'il faut s'adresser pour trouver les lois de l'électrolysation. Nous allons nous occuper exclusivement des composés binaires métalliques et des sels.

VOLTAMÈTRE. — Les vases dans lesquels on opère la décomposition de l'eau se nomment *voltamètres*. Le premier modèle que l'on ait employé a été décrit précédemment (*fig.* 502). Il offre quelques inconvénients : les acides que l'on ajoute à l'eau attaquent toujours le mastic et finissent à la longue par le décoller; quand cela arrive, le liquide coule le long des fils, entre lesquels il établit une communication extérieure et par où se fait en partie le dégagement des gaz qu'on ne recueille pas en totalité dans les cloches.

Souvent on soude ou l'on mastique au sommet des cloches elles-mêmes les fils de platine qui se prolongent en descendant jusqu'à l'ouverture inférieure (*fig.* 505). On peut plonger les cloches dans un vase quelconque; mais alors le niveau de l'eau baisse à l'intérieur pendant que les gaz se dégagent, et la surface immergée des électrodes diminue. On verra dans la suite que cette circonstance affaiblit progressivement l'intensité du courant et diminue d'autant la décomposition.

On peut encore préparer des électrodes avec des tubes de verre GH, KL (*fig.* 506) amincis et recourbés à leur base, et dans lesquels on a soudé deux fils de platine H et L qu'on termine, si l'on veut, par deux lames du même métal. On soutient ces deux tubes par une planchette CD qui se pose sur les bords du vase; on établit les communications en y versant du mercure, dans lequel on plonge les rhéophores A et B; enfin

les cloches E et F sont supportées par la partie recourbée des électrodes.

Fig. 505.

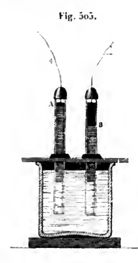
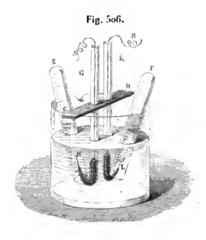


Fig. 506.



On peut encore introduire les deux électrodes L et H dans une cloche unique qui recueille à la fois les deux gaz; et comme on sait que le rapport des volumes de l'hydrogène à l'oxygène est constant, on déduit du volume total celui de chacun des élements. Il est important d'arrêter le dégagement avant que le niveau des gaz ait atteint le sommet des fils conducteurs, car le platine offre, dans ce cas, la singulière propriété de recombiner ces gaz.

Tout le monde pourra d'ailleurs imaginer des dispositions différentes; mais on devra s'assujettir à ne pas déplacer les cloches pendant les expériences, et se mettre à l'abri de toutes les circonstances qui pourraient changer la conductibilité des appareils, afin de ne pas faire varier l'intensité du courant.

Si l'on essaye l'un après l'autre deux voltamètres dans un même courant, on s'apercevra facilement qu'ils donnent plus ou moins de gaz dans le même temps; c'est une circonstance qu'il faut expliquer. Toutes les fois qu'on interpose un voltamètre dans un circuit, on diminue considérablement l'intensité du courant à cause du peu de conductibilité de l'eau que contient ce voltamètre. Si les électrodes sont très-éloignées, la

couche du liquide à traverser sera épaisse et la diminution d'intensité sera très-grande; si elles sont très-rapprochées, le courant passera mieux, et si on les remplace par des lames de platine étendues et voisines, il circulera par une plus grande surface et aura plus d'énergie. Ces différences de sensibilité des deux voltamètres peuvent donc s'expliquer par la résistance inégale qu'ils opposent au passage de l'électricité, et l'on ne doit jamais perdre de vue que le premier effet produit par leur interposition dans un courant est d'en diminuer l'intensité, de sorte qu'ils ne sont plus soumis qu'à l'action de ce courant réduit.

Mais lorsqu'on place à la fois dans le même circuit plusieurs voltamètres à la suite l'un de l'autre, les conditions sont très-différentes; ils sont traversés tous par le même courant, et l'on reconnaît qu'ils deviennent identiques et que la même quantité d'eau se décompose dans chacun d'eux, quelle que soit la différence d'action qu'ils éprouvent quand on les emploie individuellement. Pour démontrer cette identité, M. Faraday a placé dans le même circuit deux voltamètres qu'il rendait aussi différents que possible, soit par la largeur, la nature et l'écartement des électrodes, soit par la proportion et l'espèce de l'acide qu'il mêlait à l'eau, soit en remplaçant cet acide par de la potasse ou de la soude. Il a reconnu que, malgré toutes ces modifications, les quantités de gaz fournies par les deux appareils restaient toujours égales dans l'un et dans l'autre : de là on peut déduire cette première loi fondamentale, « le même » courant décompose toujours la même quantité d'eau pendant » le même temps. »

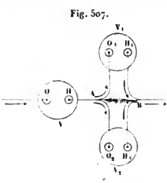
Voyons maintenant comment varie la quantité d'eau décomposée quand l'intensité du courant change. La méthode employée par M. Pouillet pour résoudre cette question consiste à placer dans le circuit qui réunit les deux pôles d'une pile un voltamètre et une boussole des sinus ou des tangentes, et à comparer l'intensité mesurée par cette boussole à la quantité de gaz recueillie dans le voltamètre pendant un temps toujours le même; or M. Pouillet a trouvé « que l'intensité est toujours » proportionnelle à la quantité de gaz. »

M. Faraday opère autrement :

Nous supposerons (*fig.* 507) que le fil conducteur qui réunit

les pôles se divise au point A en deux rameaux formés par des conducteurs de même nature, égaux en section et en longueur, et disposés suivant la même forme, puis nous les réunirons en un tronc unique B rejoignant l'autre pôle. Cela fait, nous placerons dans le courant total, et dans chacun des circuits dérivés, des voltamètres identiques V, V_1, V_2 qui ne détruiront pas la symétrie des deux branches du courant. Il est évident que, dans les parties où le conducteur est unique, le courant aura une intensité totale déterminée, et qu'il se séparera dans le circuit double en deux flux électriques d'intensité moitié moindre. Après un temps quelconque nous trouverons dans chacun des voltamètres dérivés V_1, V_2 des quantités d'eau égales entre elles et à la moitié de celle que contient V. Ces deux modes d'expériences conduisent donc à la loi suivante : « Les courants décomposent pendant » un temps donné des quantités d'eau proportionnelles à leur » intensité. »

Fig. 507.



Il résulte de là que l'on pourra indifféremment mesurer l'intensité d'un courant par une boussole ou par un voltamètre placés dans le circuit; mais il y aura entre ces deux mesures une différence essentielle.

Si nous faisons passer un même courant à travers un circuit contenant plusieurs boussoles des sinus mises à la suite l'une de l'autre, il déviera leurs aiguilles d'angles très-différents; et si l'on veut ramener ces divers instruments à un étalon unique, il faudra multiplier le sinus de leurs déviations par un facteur constant pour chacun d'eux, mais différent de l'un à l'autre, ou, si l'on veut, chaque boussole exprime l'intensité en fonction d'une unité individuelle, et pour raccorder les indications de deux d'entre elles, il faut avoir préalablement déterminé le rapport de leurs sensibilités.

Il n'en est pas de même dans la mesure électrochimique. Tous les voltamètres, quels qu'ils soient, traversés par des

courants égaux donnent la même quantité de gaz pendant le même temps; l'intensité mesurée par cette quantité n'est donc pas fonction de la sensibilité d'un appareil particulier, et l'unité de courant pourra être définie par une décomposition déterminée pendant un temps donné. Cela étant, « nous convenons » de prendre pour unité d'intensité celle du courant qui dé- » gage 1 gramme d'hydrogène en 1 minute. » Par suite, l'intensité d'un courant quelconque sera exprimée par le poids p d'hydrogène qu'il donne dans l'unité de temps,

$$i = p.$$

Il faut se rappeler maintenant que la quantité ou la masse d'électricité qui circule dans un conducteur est proportionnelle à l'intensité p de ce courant et au temps t pendant lequel il passe, et comme d'un autre côté le poids total P de l'hydrogène dégagé est égal au produit de cette intensité p par ce temps t, « P pourra servir à mesurer la quantité d'élec- » tricité e, »

$$e = \mathrm{P} = pt.$$

Cette quantité d'électricité sera égale à l'unité si $\mathrm{P} = 1$, c'est-à-dire si le poids total de l'hydrogène recueilli est égal à l'unité; et si l'on convient de représenter par 1 l'équivalent de cet hydrogène, on voit que l'unité d'électricité est celle qui décompose 1 équivalent d'eau.

Le courant est une force que l'on mesure par l'intensité p, et l'action chimique qu'elle produit est un travail qu'elle accomplit et qui est égal à pt ou au nombre d'équivalents d'hydrogène qu'elle met en liberté. Ce que nous appelons quantité d'électricité n'est donc, dans les idées de la mécanique, que la quantité de travail chimique effectué par la force pendant la durée de son action.

En résumé :

1°. L'unité d'intensité est celle du courant qui dégage 1 gramme d'hydrogène en 1 minute.

2°. L'intensité d'un courant est égale au poids d'hydrogène dégagé en 1 minute.

3°. L'unité d'électricité est la quantité qui décompose 1 équivalent d'eau.

4°. La quantité d'électricité est égale au poids de l'hydrogène qu'elle dégage.

Nous avons vu, page 13 que pour une boussole des tangentes donnée on a la formule

$$i = k \tang \delta = p.$$

On pourrait donc mesurer l'intensité vraie d'un courant avec un instrument de ce genre, si l'on connaissait k. Or on peut toujours déterminer ce coefficient, en faisant passer un courant constant à travers la boussole et un voltamètre, en observant δ et le poids p d'hydrogène dégagé en une minute, et en calculant k une fois pour toutes au moyen de l'équation précédente.

k étant connu, la même équation servira à calculer l'intensité i d'un courant quelconque qui déviera la boussole d'un angle δ, et la quantité d'électricité e qui circulera pendant un temps t, sera

$$e = kt \tang \delta.$$

COURANTS FOURNIS PAR LES MACHINES ÉLECTRIQUES. — Les machines électriques et les piles diffèrent par cette circonstance que, pendant un temps donné, les premières produisent peu d'électricité qui atteint une grande tension, et les secondes beaucoup de fluide avec une tension très-faible. Il était intéressant de chercher si, malgré ces différences qui tiennent à leur origine, les courants engendrés par les deux appareils offrent les mêmes propriétés.

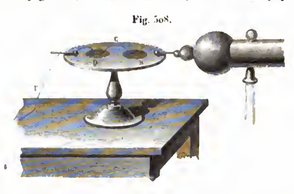
Wollaston avait imaginé de souder dans des tubes de verre des fils de platine extrêmement fins, et de limer leur extrémité de façon que le métal affleurait par un point seulement au bout du verre. Il mit deux conducteurs ainsi préparés en communication avec les deux pôles d'une machine de Nairne en activité, les plongea dans l'eau, et il vit se dégager aux extrémités du platine des bulles de gaz qu'il reconnut être le mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène. L'eau avait donc été décomposée.

Reprise ensuite par Davy, cette expérience avait paru différer essentiellement de l'électrolysation ordinaire de l'eau; en effet les deux gaz ne se dégagent point isolément, l'un au pôle

positif, l'autre au pôle négatif, mais tous deux à chaque électrode à la fois et en proportions variables. Faraday montra que cette circonstance est due à la production des étincelles qui éclatent à travers l'eau et qu'en les évitant on produit une électrolysation tout aussi régulière avec la machine électrique qu'avec les piles. On les évite en faisant circuler l'électricité à travers une longue corde mouillée.

Mais les piles déterminant la décomposition de tous les corps binaires à base métallique, il fallait étendre à tous les cas le résultat de Wollaston : c'est ce qu'a fait M. Faraday par un procédé aussi simple qu'ingénieux. Il plaçait sur une lame de verre (*fig.* 508) des gouttes de liquide ou des papiers im-

Fig. 508.



bibés B, D, et les mettait en communication, d'une part avec la machine électrique, d'autre part avec la terre, et aussi entre eux par des fils de platine très-fins, simplement posés sur le verre. Au bout de peu de temps le liquide était décomposé, ce dont on s'apercevait à des signes certains : le sulfate de cuivre donnait un dépôt de cuivre à l'extrémité négative ; l'iodure de potassium mêlé d'amidon devenait bleu au pôle positif et l'acide chlorhydrique mêlé d'encre se décolorait au même pôle.

Après avoir ainsi prouvé que les deux espèces de courants exercent les mêmes décompositions, M. Faraday chercha à comparer les quantités d'électricité fournies par une machine et par un couple. Il prit une batterie de quinze jarres qui avait une surface totale de 2760 pouces carrés, la chargea en faisant 30 tours d'une forte machine électrique, et l'ayant déchargée à travers un galvanomètre, il obtint un arc d'impulsion de

l'aiguille qu'il mesura. Lorsqu'on ne faisait que 15 tours du plateau, cette déviation se reduisait de moitié, par conséquent elle est proportionnelle à la quantité d'électricité.

Ensuite M. Faraday construisit un couple avec deux fils, l'un de zinc, l'autre de platine, qui avaient $\frac{1}{18}$ de pouce de diamètre et plongeaient de $\frac{5}{8}$ de pouce dans de l'eau très-peu acidulée, pendant $\frac{3}{150}$ de minute. Ils produisirent sur le galvanomètre le même arc d'impulsion que la batterie chargée de 30 tours : ils donnaient donc la même quantité d'électricité.

Cette expérience suffit pour montrer combien est grande l'électricité développée en un temps très-petit par un couple très-faible, et combien est minime celle que produit en un temps très-long une puissante machine. MM. Faraday, Becquerel et Buff ont cherché le rapport de ces électricités. Nous ne citerons que les expériences de M. Buff.

Il opérait avec une boussole de tangentes à très-long fil; les intensités étaient déterminées par $k \operatorname{tang} \delta$ et la quantité e d'électricité par

$$e = pt = kt \operatorname{tang} \delta.$$

M. Buff prit une bouteille de Lane qu'il chargeait par le mouvement continu d'une machine, elle se déchargeait successivement par une série d'étincelles, et produisait un courant discontinu qui traversait la boussole; il y produisait une déviation sensiblement constante δ, et l'équation précédente permettait de calculer e. D'un autre côté, soient x la quantité d'électricité que la bouteille abandonne à chaque étincelle, n le nombre de ces étincelles pendant le temps t, nx sera la quantité d'électricité ou e, et l'on aura

$$nx = kt \operatorname{tang} \delta.$$

On peut donc calculer la charge x de cette bouteille, et comme x est proportionnelle à l'étendue des armatures et à la distance d'explosion, on peut se demander quelle étendue il faudrait donner à ces armatures pour que, se déchargeant à 1 mètre de distance, elles perdissent l'unité d'électricité. M. Buff trouva 1137000 mètres carrés. C'est cette quantité d'électricité qui dégagerait 1 gramme d'hydrogène.

On peut définir l'unité d'électricité non-seulement par le

travail chimique qu'elle fait, mais aussi par l'attraction qu'elle exercerait si l'on accumulait d'un côté tout le fluide positif et de l'autre tout le fluide négatif sur deux conducteurs ou deux nuages à une distance de 1 kilomètre par exemple. C'est ce qu'ont fait MM. Weber et Kolbrausch dans un Mémoire qu'il nous est impossible d'analyser ici, et ils ont trouvé que cette attraction serait 2 268 000 000 kilogrammes.

En résumé, les deux masses de fluides contraires qui par leur circulation dans un voltamètre décomposent 9 grammes d'eau, étant accumulées sur deux armatures de 1 137000 mètres carrés feraient explosion à 1 mètre de distance et, sur deux nuages distants de 1000 mètres, exerceraient une attraction de 2 268 000 000 kilogrammes.

LOI DE FARADAY. — Quand une loi physique est constatée pour un corps arbitrairement choisi, on doit s'attendre à la retrouver dans tous les cas analogues. Nous pouvons donc très-légitimement prévoir que l'électrolysation de tous les corps qui se décomposent sans actions secondaires offrira les mêmes circonstances que l'électrolysation de l'eau, c'est-à-dire que la masse de matière décomposée sera proportionnelle à la masse d'électricité mise en circulation, et nous aurons à chercher quelle quantité d'électricité est nécessaire pour électrolyser 1 équivalent d'un composé quelconque. Ces prévisions sont en effet exactes, et non-seulement M. Faraday les a justifiées, mais il a découvert une loi dont la valeur n'a pas besoin d'être signalée; c'est que « la même quantité d'électricité que nous » avons prise pour unité est nécessaire et suffisante pour » électrolyser 1 équivalent de tous les corps binaires dont » la formule est AR. » L'extrême importance du sujet nous oblige à exposer les recherches de M. Faraday avec quelque développement.

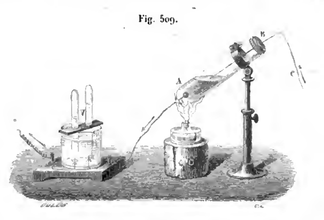
Le procédé expérimental est le même dans tous les cas. On place à la suite l'un de l'autre un voltamètre et l'appareil où se décompose l'électrolyte qu'on veut étudier. On fait passer dans ce système un courant quelconque qui n'a pas besoin d'être constant, et l'on prolonge l'action jusqu'à ce qu'il y ait dans les deux appareils une quantité suffisante de matière décomposée. On mesure le volume de l'hydrogène dégagé dans

le voltamètre, et on le multiplie par sa densité 0,0000895 pour avoir son poids P. Ce poids exprime la quantité d'électricité qui a passé. On mesure de même le poids P′ du métal déposé à l'électrode négative dans le second vase; $\frac{P'}{P}$ serait ce poids si la quantité d'électricité était égale à l'unité. Si donc on trouve que $\frac{P'}{P}$ est égal à l'équivalent du métal, on en conclura que l'unité d'électricité décompose 1 équivalent de l'électrolyte considéré.

Les premières expériences ont été faites avec des solutions concentrées des acides chlorhydrique, bromhydrique et iodhydrique qu'on plaçait dans un second voltamètre à la suite du premier. Les quantités d'hydrogène furent égales dans tous les deux. Ce résultat prouve que la même quantité d'électricité décompose à la fois le même nombre d'équivalents d'eau et de ces acides, pourvu qu'on admette qu'ils sont réellement décomposés; mais comme on pourrait expliquer l'action en supposant que l'eau seule soit électrolysée, il faut s'adresser à des corps binaires anhydres.

M. Faraday choisit d'abord le protochlorure d'étain. Il souda au fond d'un tube de verre AB un fil de platine terminé par un bouton A (*fig.* 509); ce fil avait été pesé avec soin. Il plaça le

Fig. 509.



chlorure dans le tube, le maintint fondu par une lampe à alcool, et fit arriver le courant par une électrode positive B de

graphite qui n'est point attaqué par le chlore. Après l'action, il trouva dans le tube du bichlorure, et au pôle négatif une masse d'étain qui avait été fondue et avait coulé au fond où elle s'était alliée avec le bouton A. On pesa de nouveau le platine avec le culot, et l'on compara le poids P de l'hydrogène dégagé dans le voltamètre à celui de l'étain P′ déposé par le courant. $\frac{P'}{P}$ fut trouvé égal à 58,53, qui diffère peu de l'équivalent de l'étain.

Le chlorure de plomb fut étudié de la même manière. L'oxyde et le borate de plomb, qui offrent plus de difficultés parce qu'ils fondent à des températures plus élevées et qu'ils attaquent le verre, furent placés dans des creusets de platine; dans ces trois cas, les valeurs de $\frac{P'}{P}$ furent trouvées égales à 100,85, 93, 101,29. Ces nombres diffèrent sensiblement de l'équivalent du plomb qui est 103,6, mais les différences rentrent dans les erreurs d'observation.

Après avoir confirmé ces résultats par quelques autres expériences sur des substances analogues, M. Faraday modifia son mode d'opération. Au lieu d'empêcher l'altération des électrodes positives, il la favorisa en laissant se dissoudre au pôle positif le métal qui se déposait à l'électrode négative. Ainsi les chlorures d'argent et de plomb étaient décomposés par deux lames d'argent et de plomb, et le poids de l'une augmentait autant que celui de l'autre diminuait. Les résultats numériques furent conformes à la loi annoncée.

M. Faraday n'avait guère étudié que les composés binaires de la formule AR. Presque à la même époque, et par des procédés différents, M. Matteucci était arrivé de son côté à énoncer la même loi et quelques autres que nous ferons bientôt connaître. Il électrolysait des sels rendus conducteurs par la fusion ignée : par exemple, l'acétate et le borate de plomb et l'azotate d'argent; puis il les fit dissoudre dans l'eau, et dans les deux cas il trouva qu'il fallut 1 unité d'électricité dynamique pour décomposer 1 équivalent de chacun d'eux. Daniell étudia ensuite les sels alcalins : il plaça du sulfate de soude dans un voltamètre qui était partagé en deux parties par une cloison poreuse, de sorte que l'acide et l'oxygène se portaient dans

l'une, et l'oxyde avec l'hydrogène dans l'autre; il trouva encore que l'unité d'électricité met en liberté 1 équivalent de chacun de ces corps. Cela montre que la réaction qui transforme le sodium en soude et en hydrogène n'altère en aucune façon la loi.

M. Matteucci eut l'idée de soumettre à l'électrolysation un mélange de deux sels; chacun d'eux était décomposé, et pour l'unité d'électricité, il ne se déposait qu'une fraction d'équivalent de chaque métal, mais la somme de ces deux fractions était égale à l'unité.

Dans tous ces exemples, on n'a considéré que des composés formés par 1 équivalent de métal et 1 équivalent de radical, c'est-à-dire d'acide suroxygéné ou de métalloïde. Il était essentiel de chercher comment la loi se modifie quand on s'adresse à des corps dont la formule chimique est plus complexe. M. Matteucci a d'abord trouvé que le bichlorure de cuivre $Cu\,Cl$ obéit à la loi de Faraday, mais que le protochlorure Cu^2Cl donne 2 équivalents de cuivre et 1 équivalent de chlore, quand il est traversé par l'unité d'électricité.

M. E. Becquerel a examiné ensuite une série de chlorures, d'iodures et d'oxydes dont la composition était très-différente, ou des sels acides et basiques, et il a trouvé que pour l'unité d'électricité il y avait toujours 1 équivalent du métalloïde ou de l'acide suroxygéné mis en liberté au pôle positif, avec la quantité correspondante de métal au pôle négatif; ou, ce qui revient au même, que pour décomposer 1 équivalent d'un composé de la formule $A^m R^n$, il faut autant d'unités d'électricité qu'il y a d'équivalents du radical dans la formule, c'est-à-dire m. C'est donc la proportion d'acide ou de métalloïde et non celle de la base qui détermine la quantité de décomposition. On peut dire toutefois que la généralisation précédente a besoin d'être justifiée par de nouvelles études.

La loi de Faraday ainsi étendue se résume donc par l'énoncé suivant : « Toutes les fois qu'une unité d'électricité dynamique » traverse un électrolyte, elle met en liberté 1 équivalent du » métalloïde ou de l'acide avec la quantité de métal qui lui » correspond dans la combinaison. »

SOIXANTE-QUATRIÈME LEÇON.

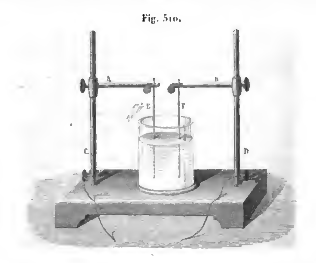
DU TRAVAIL CHIMIQUE INTÉRIEUR.

Concomitance de l'action chimique et de la force électromotrice. — Cas des liquides et des métaux. — Cas des corps simples. — Cas des acides et des oxydes. — Idée première de la théorie des piles.
Propriétés du zinc amalgamé. — Distinction de deux actions chimiques dans un couple. — Loi du travail chimique intérieur. — Il est produit par le passage du courant.

CONCOMITANCE DE L'ACTION CHIMIQUE ET DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE. — Nous étudierons dans cette leçon les actions chimiques qui se produisent dans les auges d'une pile.

Pour préparer aisément des couples très-divers, nous nous servirons de l'appareil représenté dans la *fig.* 510; il se com-

Fig. 510.



pose d'une base en bois sur laquelle s'élèvent deux colonnes de laiton C et D mises en communication par leur base avec un

galvanomètre, et le long desquelles glissent deux traverses A et B qu'on fixe à une hauteur convenable par des vis de pression. Aux extrémités de ces traverses, deux pinces servent à saisir des fils ou des lames de métaux différents E et F qui plongent dans un bocal plein de liquide. Il est clair que si les métaux sont choisis de telle sorte que la force électromotrice qui se développe au contact du liquide soit plus grande sur E que sur F, un courant passera par FBD, traversera le galvanomètre et reviendra par CAE. C'est ce qui arrive quand E est une lame de zinc, F un fil de platine et le liquide un acide étendu.

Dans cette expérience, l'eau est décomposée, l'hydrogène se dégage et l'acide suroxygéné se fixe sur le zinc qui se dissout dans l'acide. Tant que cette action chimique se continue, le courant persiste; quand elle diminue, il s'affaiblit; si elle cesse, il est nul. Nous commençons à remarquer qu'il y a là deux phénomènes concomitants qui varient en même temps et dans le même sens; nous allons maintenant montrer, par quelques exemples empruntés aux travaux de MM. Becquerel, de la Rive, Pouillet, Matteucci et Faraday, que cette remarque est générale et se vérifie dans tous les cas particuliers.

I. **CAS DES LIQUIDES ET DES MÉTAUX.** — 1°. F étant toujours en platine, mettons en E un fil de cuivre ou d'argent. Si le vase contient de l'acide sulfurique étendu, il n'y a ni action chimique ni courant; quand on emploie de l'acide azotique, l'argent ou le cuivre se dissolvent et un courant se manifeste.

2°. Avec une dissolution de sulfate de cuivre et un métal qu'elle n'attaque pas (cuivre, argent, etc.), il n'y a point de courant; avec un métal qu'elle dissout (zinc, fer, etc.), le courant se montre.

3°. Le sulfure de potassium dissous ne produit ni action chimique ni courant quand E est en fer. Un courant se développe d'abord et cesse bientôt après, si l'on emploie de l'étain, du plomb ou du bismuth, parce qu'il se forme un sulfure adhérent qui arrête l'action chimique. Le cuivre, l'antimoine et l'argent se recouvrent également d'une couche de sulfure, mais qui n'adhère point; aussi l'action chimique et le cou-

rant ne font que s'affaiblir sans s'annuler. Avec le zinc, dont le sulfure est soluble dans le liquide, on obtient une action chimique et un courant sensiblement constants.

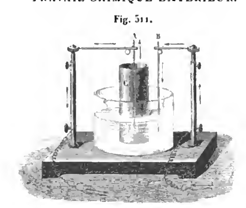
4°. On fixe deux fils d'or identiques en E et en F, on les plonge dans l'acide azotique et on les y laisse jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre, toujours déviée au commencement par des actions perturbatrices, revienne au zéro du cadran. Ensuite on verse avec une pipette quelques gouttes d'acide chlorhydrique autour du fil E; il est immédiatement attaqué et l'aiguille est instantanément déviée. Au bout de quelque temps, l'action chimique s'épuise et le courant cesse; mais on peut les reproduire l'un et l'autre en sens opposé, en mettant de nouvel acide chlorhydrique au voisinage du fil F.

II. **CAS DES CORPS SIMPLES.** — 1°. On peut remplacer F par une tige de charbon, E par une lame métallique quelconque, et les plonger dans une solution de chlore ou d'iode; le métal est attaqué et le sens du courant indique qu'il devient négatif.

2°. M. Pouillet place sur le plateau supérieur d'un électromètre un cône de charbon allumé à son sommet, et il entretient la combustion par un jet d'oxygène ou d'air. Au bout de peu d'instants, l'appareil est chargé et le plateau supérieur a reçu de l'électricité négative. On peut aussi disposer le charbon sur un support métallique au-dessous de l'électromètre et projeter l'oxygène de manière qu'il rencontre d'abord le charbon, ensuite le plateau inférieur; on trouve que les lames d'or prennent l'électricité positive.

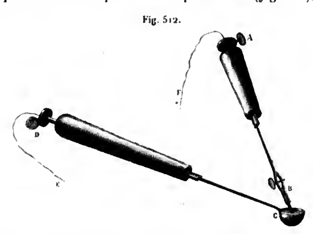
III. **CAS DES ACIDES ET DES OXYDES.** — Plaçons dans un bocal de verre un vase en terre cuite poreuse C (*fig.* 511). Versons un acide dans ce vase et une solution de potasse à l'extérieur, puis mettons les deux liquides en communication avec un galvanomètre par deux tiges de platine A et B et par les supports de l'appareil; ils se combineront peu à peu à travers la paroi poreuse et nous constaterons aussitôt l'existence d'un courant énergique allant dans le sens des flèches, de l'acide vers l'alcali, ce qui veut dire que l'acide est positif au contact de l'alcali qui prend l'électricité opposée.

Fig. 511.



L'expérience peut être exécutée d'une autre manière avec une petite cuiller en platine C remplie d'acide (*fig.* 512), dans

Fig. 512.



laquelle on plonge, au moyen d'une pince B également en platine, un morceau de potasse caustique. La cuiller et la pince sont prolongées jusqu'aux deux boutons D et A qui servent à les mettre en communication par des fils E et F avec un galvanomètre; elles sont enveloppées et isolées par deux manches en bois. Le courant est très-faible, parce que la potasse est peu conductrice; mais comme à chaque immersion l'aiguille reçoit une impulsion dans le même sens, on plonge et on soulève la pince alternativement, de manière à faire coïn-

cider les immersions et les interruptions avec les mouvements d'aller et de retour que l'aiguille effectue pendant ses oscillations.

De ces expériences et d'une multitude d'autres que nous n'avons point rapportées, ressortent les conclusions suivantes:

1°. Quand il n'y a pas d'action chimique, il n'y a pas de courant, ou, réciproquement, quand il n'y a pas de courant, il n'y a pas d'action chimique.

2°. Lorsqu'on prépare un couple en réunissant par un arc de platine qui n'est pas attaqué, ou un métal et un liquide qui le dissout, ou bien un corps simple et un métalloïde qui joue vis-à-vis de lui le rôle d'acide, ou bien enfin un oxyde et un acide, il y a toujours un courant qui accompagne l'action chimique.

3°. Le sens du courant indique que le métal, le corps simple ou l'oxyde prennent l'électricité négative, et que le liquide, le métalloïde ou l'acide se chargent positivement.

4°. La quantité d'action chimique et l'intensité du courant produit augmentent et diminuent en même temps, nous démontrerons qu'elles sont proportionnelles.

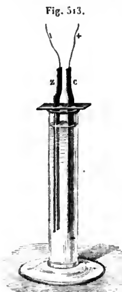
Il ne faut pas tirer de ces expériences une conclusion qu'elles ne comportent pas; elles ne nous montrent qu'une chose, c'est que dans les conditions où nous sommes placés, l'action chimique et le courant *s'accompagnent toujours*, mais elles ne prouvent en aucune façon que l'action chimique précède et développe la force électromotrice, pas plus qu'elles ne nous apprennent le contraire, c'est-à-dire que la force électromotrice préexiste et produise l'action chimique. Cependant, en voyant qu'il existe un rapport constant entre ces deux phénomènes, les physiciens se sont accordés pour admettre que l'un doit être la cause de l'autre; mais ils diffèrent d'opinion quand il s'agit de savoir quel est celui qui est la cause, et quel est celui qui est l'effet. Les partisans de l'action chimique admettent que les molécules sont sollicitées à se combiner par une attraction spéciale qui est *l'affinité*, et que l'acte de leur réunion sépare une quantité d'électricité proportionnelle à leur nombre. Les partisans du contact soutiennent, au contraire, qu'il existe entre certains corps hétérogènes au contact *une force électromotrice* spéciale qui commence par séparer les fluides et que les molécules chargées

ainsi d'une quantité donnée d'électricités contraires s'attirent et se réunissent en nombre proportionnel à cette quantité. Bien que ces deux hypothèses ne soient peut-être pas le dernier mot de la science, nous nous réservons de les préciser davantage et de les discuter dans la suite; mais avant d'y arriver, nous allons résumer avec soin tous les phénomènes qui peuvent nous éclairer sur un point si important et si délicat.

ZINC AMALGAMÉ. — Nous commencerons par faire connaître une propriété singulière que M. de la Rive a découverte dans le zinc pur, et Kemp dans le zinc amalgamé, propriété à laquelle on doit à la fois un grand perfectionnement de la construction des piles et un grand progrès de leur théorie.

Quand on plonge dans l'acide sulfurique étendu une lame de zinc ordinaire, elle est immédiatement attaquée et dégage à sa surface un courant continu d'hydrogène en bulles très-petites. Si on fait la même épreuve avec une lame identique de zinc pur ou de zinc ordinaire primitivement amalgamé, elle n'éprouve aucune altération sensible, seulement elle se revêt de bulles d'hydrogène qui grossissent peu à peu, restent adhérentes à la surface et ne se dégagent qu'avec une extrême difficulté.

Fig. 513.



Nous allons chercher si cette différence d'action est accompagnée d'une variation quelconque dans l'état électrique du métal. A cet effet, nous préparerons deux couples formés de lames C et Z identiques (*fig.* 513) que nous plongerons dans deux vases égaux, contenant la même eau acidulée, et nous ferons en sorte qu'il n'y ait aucune différence entre eux, si ce n'est que le zinc de l'un sera amalgamé et celui de l'autre à l'état ordinaire. Nous mettrons les lames C et Z en communication avec un électromètre condensateur; nous trouverons que le cuivre est positif et le zinc négatif, et nous ne constaterons aucune

inégalité sensible dans l'énergie de la charge des deux couples. Conséquemment, l'action chimique continue à laquelle est soumis le zinc ordinaire ne détermine pas la production de l'électricité statique, puisque l'absence de cette décomposition sur le zinc amalgamé ne l'empêche pas.

Laissant les deux expériences comparatives préparées comme il vient d'être dit, réunissons dans les deux couples le cuivre au zinc par l'intermédiaire d'un galvanomètre, ou en faisant toucher leurs parties supérieures : alors le courant s'établit.

Étudions d'abord le cas où le zinc est amalgamé.

Au moment même où l'on ferme le circuit, l'eau commence à être décomposée, mais avec des circonstances tout exceptionnelles. L'hydrogène se dégage, non contre le zinc, mais en bulles serrées sur la surface du cuivre, et le zinc amalgamé, qui jusqu'alors était inactif, se dissout peu à peu sans changer aucunement d'aspect, sans cesser d'être recouvert des mêmes bulles adhérentes qui signalaient la première phase de l'expérience. Toutes les fois qu'on ouvre le circuit, le dégagement d'hydrogène sur le cuivre et la dissolution du zinc s'arrêtent; toutes les fois qu'on le ferme et que le courant se rétablit, les deux actions recommencent. Si donc nous avons pu dire précédemment qu'il n'y a point de courant sans action chimique, nous pouvons constater maintenant qu'il n'y a point d'action chimique continue sans courant.

Ce courant marche du cuivre au zinc dans le galvanomètre. Or, si on supposait qu'il fût produit par une cause extérieure et qu'on le fît passer dans le couple que nous étudions, il traverserait le liquide du zinc au cuivre, le décomposerait en portant l'acide suroxygéné sur le zinc qui alors se dissoudrait, et en dégageant l'hydrogène sur le cuivre, c'est-à-dire qu'il reproduirait précisément, avec tous ses caractères, l'action chimique à laquelle donne lieu la fermeture du circuit dans le couple. Tout cela peut se résumer en disant : 1° qu'il n'y a point d'action chimique continue si le circuit est ouvert; 2° qu'elle se produit immédiatement quand le courant passe; 3° qu'elle est absolument identique à l'électrolysation que produirait ce courant si on le puisait à une autre source.

Répétons les mêmes épreuves avec une lame de zinc ordinaire. Elle dégageait de l'hydrogène quand le circuit était ou-

vert; elle en dégage encore tout autant et pas plus lorsqu'on le ferme. Cette action est donc permanente, sans influence sur la charge statique du couple isolé, et sans relation avec le courant qu'il produit. Mais si on fait abstraction de cette décomposition anormale que rien n'active ou n'empêche, on retrouve, en fermant le circuit, tous les phénomènes qu'offrait le zinc amalgamé, c'est-à-dire un courant qui traverse le galvanomètre de C à Z, et une nouvelle décomposition de l'eau qui transporte l'hydrogène sur le cuivre et l'oxygène sur le zinc dont la dissolution s'accélère, décomposition qui naît quand le contact s'établit et qui s'arrête quand on le détruit.

Les deux espèces de zinc offrent donc : 1° des phénomènes communs : des tensions égales aux pôles quand le circuit est ouvert, et, quand il est fermé, un courant et une action chimique qui a tous les caractères d'une électrolysation déterminée par ce courant ; 2° des phénomènes individuels, savoir : le zinc amalgamé, des bulles d'hydrogène qui restent adhérentes; le zinc ordinaire, un dégagement continu du même gaz à sa propre surface. Mais ces derniers phénomènes n'ont rien de commun avec la tension ni avec le courant.

Pour expliquer le dégagement continu de l'hydrogène sur le zinc du commerce, on admet que ce métal étant généralement impur, il offre à sa surface des points tels que O et H (*fig.* 514), où la force électromotrice est très-différente, et qu'étant réunis par un conducteur qui est la masse même du zinc, ils forment un couple à circuit fermé. Dès lors l'un d'eux, O, doit être attaqué, et l'autre, H, doit dégager de l'hydrogène. Deux faits semblent justifier cette manière de voir : le premier est la difficulté qu'on éprouve à attaquer le zinc distillé pur et homogène qui se comporte comme s'il était amalgamé, le second est qu'on voit en effet à la surface du zinc ordinaire des points sur lesquels naissent les bulles et qui ne s'attaquent pas, tandis que les parties voisines se creusent et ne dégagent rien ; ces points changent d'ailleurs de place quand la corrosion du métal en découvre d'autres qui les remplacent.

Fig. 514.

H +

O

Cette propriété du zinc amalgamé se maintient quand, au lieu d'étudier un seul couple, on en réunit un nombre quelconque:

la pile à tasses de M. Gassiot avait été spécialement construite pour le démontrer; elle avait 3500 éléments amalgamés, amorcés avec de l'eau de pluie, et elle était parfaitement isolée. C'est la seule pile connue qui ait developpé à ses pôles une tension suffisante pour donner des étincelles visibles entre deux conducteurs séparés par un intervalle appréciable. Or, tant que les pôles furent séparés, ils manifestèrent cette tension sans que l'on pût constater d'action chimique dans les couples; même on remplaça l'un d'eux par un vase rempli d'iodure de potassium et d'amidon sans que ce liquide se colorât en bleu. Mais aussitôt que l'on fermait le circuit, le courant se développait, et en même temps le travail chimique, c'est-à-dire une électrolysation dans le sens de celle que le courant produirait s'il en était la cause. Ainsi, en résumé, 1° circuit ouvert: tension aux pôles et pas d'actions chimiques; 2° circuit fermé: courant et électrolysation. Ce sont les conséquences auxquelles nous avait conduit l'examen d'un seul couple.

DISTINCTION ENTRE DEUX ACTIONS CHIMIQUES DANS LES COUPLES. — Les propriétés que nous venons d'analyser dans le couple zinc-cuivre se retrouvent dans tous ceux que nous avons examinés à la page 65. Il est essentiel d'y distinguer deux actions chimiques différentes : l'une inefficace, l'autre qui est une électrolysation nécessaire.

1°. On plonge du zinc et du platine dans le sulfate de cuivre: tant que le circuit est ouvert, on voit le zinc se couvrir d'un dépôt de cuivre, comme il se couvrait d'hydrogène dans l'acide sulfurique étendu. C'est, à l'origine, l'effet de la même action inefficace. Quand on ferme le circuit, ce dépôt change de place et se fait sur le platine pendant que le zinc se dissout; ces phénomènes sont ceux du cas précédent, avec cette différence que le sulfate de cuivre SO^4Cu est électrolysé, au lieu du sulfate d'hydrogène SO^4H.

2°. Deux lames, l'une de platine, l'autre de zinc, sont placées dans le sulfure de potassium : une action inefficace lente se remarque pendant que le circuit est ouvert; quand il est fermé, le courant marche du platine au zinc à l'extérieur, du zinc au platine dans le liquide, et celui-ci se sépare en soufre

qui attaque le zinc et en potassium qui se rend sur le platine et où par une action secondaire il dégage de l'hydrogène.

3°. Quand l'acide sulfurique et la potasse séparés par une cloison poreuse sont réunis par un fil de platine BCDA, un courant suit ce conducteur et revient dans le liquide de A en B.

D C
KO SO^3
A B

Ce courant doit transporter en A l'acide sulfurique et l'oxygène, et en B le potassium qui se transforme en potasse et hydrogène : c'est en effet ce qu'on observe. Mais quand le circuit reste ouvert, les deux liquides se mêlent lentement par endosmose, sans qu'il y ait aucun dégagement de gaz, et se combinent sans effet utile.

4°. On met dans l'intérieur du vase poreux (*fig.* 510) du sulfate de fer et une lame de fer A, et à l'extérieur du sulfate de cuivre avec une lame de platine B : aucune action ne se produit tant que le circuit est ouvert; quand on le ferme, on voit le fer se dissoudre, ce qui prouve que l'acide sulfurique suroxygéné SO^4 se porte sur lui, et en même temps le platine se recouvre de cuivre. Si l'on ajoutait un excès d'acide sulfurique dans le sulfate de fer, une action permanente dégagerait de l'hydrogène sur le fer, mais elle n'ajouterait rien à l'intensité du courant et ne changerait pas l'électrolysation qu'on remarque quand il passe.

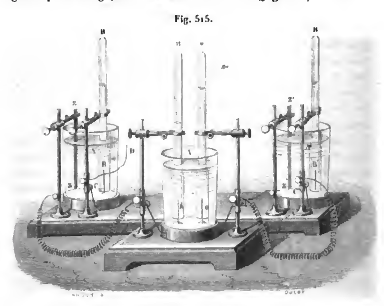
Il est maintenant évident que dans tous les éléments des piles formées avec du zinc ordinaire, il y a une action chimique nécessaire et efficace, généralement très-faible, qui s'établit quand le circuit est fermé, et qu'il y en a une autre souvent très-vive et permanente qui ne sert à rien qu'à user les piles. Celle-ci, il faut la supprimer, et c'est ce qu'on fait en amalgamant les zincs. Alors tout se réduit à une simplicité parfaite : il n'est plus nécessaire d'inventer des dispositions pour plonger les éléments dans les vases au moment voulu et les en retirer quand on arrête l'expérience; on prépare la pile une fois pour toutes et on la peut abandonner à elle-même : la dissolution du zinc ne se fait que si le courant passe; elle s'arrête toutes

les fois qu'on interrompt les communications, et après ces interruptions qui peuvent durer très-longtemps, la pile, qui n'a fait que se reposer, est prête à reprendre toute son activité si on rétablit le courant. Dans ce qui va suivre, nous négligerons absolument les actions inefficaces pour ne considérer que l'électrolysation qui accompagne le courant et qui constitue le véritable travail chimique intérieur. Nous allons comparer ce travail à la quantité d'électricité produite.

LOI DU TRAVAIL CHIMIQUE INTÉRIEUR. — M. Matteucci a énoncé la loi suivante : « Quand une unité d'électricité dynamique » a été produite, un équivalent de zinc a été dissous dans cha- » cun des couples de la pile; il en est de même si l'on rem- » place le zinc par un autre métal susceptible d'être attaqué » par le liquide. » Depuis lors, Daniell a repris ce sujet et a développé cette loi par les expériences que nous allons rapporter.

Il disposa la pile de manière à pouvoir recueillir l'hydrogène qui se dégage sur la lame de cuivre (*fig.* 515).

Fig. 515.



Le premier élément de cette pile est plongé dans le vase A ;

il se compose d'une lame de zinc ZZ qui est le pôle négatif et d'un fil de platine B qui remplace l'élément cuivre; ce fil est recouvert d'une cloche BB et communique au zinc suivant par CD. Tous les couples sont liés entre eux de la même manière, jusqu'au dernier A'. On ferme le circuit en réunissant les deux pôles avec les deux électrodes *o* et *h* d'un galvanomètre V, et au bout d'un certain temps on peut mesurer les quantités de gaz dégagées. Or Daniell a reconnu qu'elles étaient égales, soit dans les cloches des couples, soit dans celle du voltamètre.

Ensuite il changea la disposition de la pile : au lieu de placer les couples à la suite dans une série linéaire, il les groupa de manière à former plusieurs piles distinctes égales ou inégales, puis il réunit tous les rhéophores positifs en un seul et à l'un des fils du voltamètre, et tous les rhéophores négatifs à l'autre fil, de façon que chaque pile partielle était traversée par son propre courant, et le voltamètre par la somme des courants; il trouva dans ce voltamètre une quantité d'hydrogène égale à la somme de celles qui étaient dégagées dans chaque élément des diverses piles.

Les couples pouvaient être amorcés avec des liquides plus ou moins acidulés, ou différents en nature, ce qui permettait de leur donner une énergie très-inégale quand on les examinait individuellement; mais quand on les réunissait en série linéaire, ils devenaient tous identiques, c'est-à-dire qu'ils dégageaient tous des volumes d'hydrogène égaux entre eux et à celui du voltamètre, parce qu'étant alors traversés à la fois par la somme des courants produits par chacun d'eux, ils éprouvaient une égale électrolysation.

Voulant généraliser cette épreuve, Daniell imagina de placer plusieurs éléments orientés dans le même sens à la suite les uns des autres et d'y ajouter un dernier couple dirigé inversement. L'action dans ce dernier élément étant contraire à celle des premiers, le courant total devait être et fut en effet affaibli; mais ce qu'il y eut d'important, c'est que l'action demeura la même dans tous les couples et que l'électrolysation fut renversée dans l'élément retourné : l'hydrogène se dégagea sur le zinc et l'oxygène sur le platine.

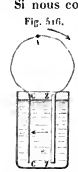
Enfin, continuant la même marche logique, qui consiste à

étendre à des cas de plus en plus complexes les résultats trouvés pour des exemples simples, Daniell prépara une pile avec des éléments tout à fait dissemblables par la grandeur et la nature des métaux, ainsi que par la composition des liquides électromoteurs qui étaient, ou de l'eau acidulée, ou des sulfates de zinc, ou des sels de cuivre, et il reconnut que dans tous les cas il y avait 1 équivalent de liquide décomposé dans les couples, en même temps que 1 équivalent d'hydrogène dégagé dans le voltamètre extérieur.

En général, on peut imaginer une pile composée, comme on le voudra, de couples absolument quelconques orientés les uns dans un sens, les autres en sens opposé, et l'on peut réunir les pôles de cette pile par une chaîne de voltamètres contenant tous les électrolytes possibles. Quand on fermera le circuit, « l'électrolysation se fera dans tous les liquides comme si un même courant traversait le circuit, du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur extérieur, et du pôle négatif au pôle positif dans la pile; et, quand 1 unité d'électricité dynamique aura parcouru le circuit total, il y aura 1 équivalent de liquide décomposé, soit dans chacun des voltamètres, soit dans chacun des couples actifs, de façon que le travail chimique sera égal dans chaque auge. » C'est là précisément l'énoncé auquel M. Matteucci était arrivé dès 1834, et qui a été surabondamment vérifié depuis par les expériences de MM. Buff, Soret et Despretz; il exprime la loi générale du travail chimique établie par l'expérience seule et indépendante de toute considération théorique. Nous allons maintenant l'interpréter.

Si nous considérons un couple unique (*fig.* 516), la force électromotrice, quelle que soit la cause à laquelle on la rapporte, se développera en ZZ, et chargera le liquide d'électricité positive; celle-ci le traversera de ZZ en CC, puis reviendra de CC en ZZ par le circuit CAZ. De même, l'électricité négative se portera sur ZZ, passera de ZZ en CC par le conducteur A, et de CC en ZZ par le liquide. Que ce transport inverse des deux électricités contraires se produise directement ou par décompositions et recompositions successives, cela n'importe pas : ce qui est

Fig. 516.



évident, c'est que le même courant traversera le liquide aussi bien que le conducteur extérieur, qu'il décrira un cercle complet et que la même quantité d'électricité passera à la fois par une section quelconque de ce liquide et de ce conducteur. La section de contact ZZ ne différera des autres que parce qu'elle est l'origine du mouvement électrique, mais celui-ci se produira de la même manière à travers elle qu'à travers toutes. Donc l'électrolysation devra se faire dans le liquide intérieur, et il y aura transport de l'acide suroxygéné sur ZZ et de l'hydrogène sur CC, en quantités égales à celles qui se dégageraient dans le conducteur extérieur s'il contenait un voltamètre.

L'égalité du travail chimique à l'intérieur et à l'extérieur des piles est donc un fait nécessaire et indépendant de toute hypothèse sur la cause des courants. Par suite, nous admettrons les conclusions suivantes :

1°. Le même courant traverse tout le circuit en décrivant une courbe fermée; il va du pôle positif au pôle négatif dans le conducteur interpolaire; il revient du pôle négatif au pôle positif dans la pile.

2°. C'est le passage de ce courant qui produit une électrolysation nécessairement équivalente dans toutes les auges traversées, soit dans le conducteur extérieur, soit dans les couples de la pile.

SOIXANTE-CINQUIÈME LEÇON.

THÉORIE CHIMIQUE DES PILES. — PILES A COURANT CONSTANT.

Mode de décomposition dans l'électrolysation. — Phénomènes de transport. — Hypothèses électrochimiques. — Oxygène ozoné.
Causes d'affaiblissement des piles. — Polarisation des électrodes. — Pile à gaz. — Résistance au passage des courants. — Piles à courant constant, — de Daniell, — de Grove, — de Bunsen.

Jusqu'à présent nous n'avons étudié que les lois expérimentales qui règlent le travail chimique des piles. Elles résument toutes les connaissances précises que nous possédons sur ce sujet, et suffisent pour toutes les applications que nous aurons à faire.

Mais elles ne suffisent point à l'esprit, puisqu'elles ne sont liées entre elles par aucune interprétation théorique. Or, comme elles résultent évidemment des rapports qui existent entre l'électricité et la constitution de la matière, il faut tâcher de découvrir ces rapports, afin d'en faire découler ces lois elles-mêmes. Il s'agit, en un mot, de créer un système hypothétique pour expliquer ce que l'on sait et pour deviner ce que l'on ne sait pas. Les idées que nous allons exposer n'auront qu'une valeur d'imagination, et ne seront, si on les admet, que des vérités de convention et pour ainsi dire provisoires.

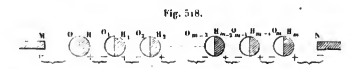
MODE D'ACTION DANS L'ÉLECTROLYSATION. — Tout le monde est d'accord sur l'explication qu'on doit donner du transport aux deux pôles opposés des molécules séparées par l'électrolysation : cette explication est due à Grotthus. Déjà nous avons admis avec M. de la Rive que dans un conducteur solide les deux pôles M et N (*fig.* 517) décomposent par influence l'électricité neutre des molécules A, B, C,..., et que les ten-

sions opposées croissent jusqu'au moment où les attractions

Fig. 517.

des fluides contraires peuvent vaincre la résistance intermoléculaire, décomposer le fluide neutre et céder de l'électricité négative à + M et positive à — N. La transmission des courants doit se faire de la même manière dans tous les corps solides ou liquides, et en particulier dans l'eau (*fig.* 518). Mais comme

Fig. 518.



dans ce cas les molécules formées d'oxygène et d'hydrogène sont dissymétriques, on admet que l'action d'influence commence par les orienter en une série régulière dans laquelle l'oxygène se place du côté de + M en se chargeant négativement, et l'hydrogène du côté de — N en devenant positif. Alors O est attiré vers + M, H vers O_1, et ainsi de suite, par des forces électriques qui tendent à séparer les atomes constituants, et qui croissent jusqu'à faire équilibre à l'affinité. A partir de ce moment, toutes les molécules se décomposent.

Le premier atome O d'oxygène se porte sur + M, le dernier H_m d'hydrogène se dégage sur — N, tous les atomes intermédiaires se recombinent de l'un au suivant, comme cela est indiqué par des accolades, et ils reconstituent des molécules d'eau nouvelles, à l'état neutre et orientées inversement; puis, l'action des pôles recommençant, le même effet se reproduit à intervalles successifs tant que passe le courant, et il est clair que la quantité de décomposition est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe. Cette explication ne préjuge absolument rien sur l'état électrique des molécules, ni sur la nature de l'affinité, qu'elle laisse indéterminés; elle ne suppose qu'une seule propriété sur laquelle nous reviendrons, celle que posséderaient les molécules de s'orienter et de se séparer.

Tous les cas de l'électrolysation s'expliquent avec la même

facilité; nous nous contentons de les représenter par les symboles suivants, qui peuvent nous dispenser de tout détail nouveau.

Composés binaires (chlorures).

$$+\,M \;\underset{+}{——}\; \underset{-}{Cl}\,\underset{+}{R} \mid \underset{-}{Cl}\,\underset{+}{R} \mid \;\ldots\; \mid \underset{-}{Cl}\,\underset{+}{R} \mid \underset{-}{Cl}\,\underset{+}{R} \;\underset{-}{——}\; N\,-$$

Sels (sulfates).

$$+\,M \;\underset{+}{——}\; \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{R} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{R} \mid \;\ldots\; \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{R} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{R} \;\underset{-}{——}\; N\,-$$

PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT. — Quelquefois le transport des éléments mis en liberté est plus complexe sans être plus difficile à expliquer. Je suppose que l'on reprenne l'appareil de la *fig.* 511, page 67, que l'on mette de la potasse dans le bocal de verre, de l'acide sulfurique dans le vase poreux, et que l'on fasse passer un courant dans le sens indiqué par les flèches, de la potasse à l'acide. Il se dégagera de l'oxygène au pôle positif B, de l'hydrogène à l'électrode négative A, et au bout d'un temps suffisamment long on trouvera que l'acide et la potasse ont changé de place. Ce transport se fait comme il suit par des décompositions successives.

$$\overset{}{+\,A \;\underset{+}{——}\; \underset{-}{O}\,\underset{+}{K} \mid \underset{-}{O}\,\underset{+}{K} \mid \underset{-}{O}\,\underset{+}{K}} \overset{C}{\Vert} \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \;\underset{-}{——}\; B\,-$$

L'acide SO^4 traverse la cloison C pour former du sulfate de potasse du côté de + A; le potassium marche en sens inverse pour former aussi le même sel vers — B; à son tour, ce sel est décomposé, et cette action ne se termine que lorsque tout l'acide et toute la potasse se sont portés aux pôles positif et négatif. La même chose aura lieu si l'on étudie deux sels quelconques, par exemple

$$+\,M \;\underset{+}{—}\; \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{Cu} \mid \;\ldots\; \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{Cu} \overset{C}{\Vert} \underset{-}{AzO^6}\,\underset{+}{Ag} \mid \;\ldots\; \mid \underset{-}{AzO^6}\,\underset{+}{Ag} \;\underset{-}{—}\; N\,-$$

On doit à Davy des expériences plus curieuses. Il disposait à la suite l'une de l'autre trois capsules, A, B, C (*fig.* 519), contenant : la première de la potasse, la deuxième de l'eau, la

troisième de l'acide sulfurique ; il les réunissait par deux mè-

Fig. 519.



ches d'amiante mouillée M et N, et faisait passer un courant de A en C.

$$+A \underset{+}{\text{———}} \underset{-}{O}\,\underset{+}{K} \mid \underset{-}{O}\,\underset{+}{K} \overset{M}{\parallel} \underset{-}{O}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{O}\,\underset{+}{H} \overset{N}{\parallel} \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \underset{-}{\text{———}} C -$$

En considérant les mèches M et N comme des cloisons, on voit que le potassium traverse la première en allant vers — C, pendant que SO^4 marche vers + A. Comme, d'après la loi de Faraday, le même nombre d'équivalents s'électrolyse à la fois dans les trois auges, celle du milieu contient bientôt du sulfate neutre de potasse, qui à son tour se décompose en transportant SO^4 à + A et K à — C. Par conséquent, le liquide doit rester toujours neutre dans la capsule B, et à la fin de l'opération ce liquide est de l'eau pure comme au commencement. Mais si l'on mettait dans les auges extrêmes de l'azotate de baryte et du sulfate de potasse, on verrait du sulfate de baryte se précipiter dans l'auge moyenne et échapper par là à toute décomposition ultérieure.

Tous ces phénomènes s'expliquent donc une fois qu'on a admis le principe des décompositions successives. Mais quand on veut aller plus loin, et qu'on se demande comment il se fait que les molécules s'orientent d'abord et se séparent ensuite par l'effet du courant, il faut absolument imaginer une relation entre la force inconnue que l'on appelle affinité, et cette autre force tout aussi peu déterminée que l'on nomme électricité, ou, ce qui est la même chose, inventer le rôle que l'électricité joue dans la constitution de la matière.

Hypothèse électrochimique. — Ampère suppose que les atomes possèdent une électricité qui leur appartient en propre, les uns la positive, c'est le cas de l'hydrogène et des métaux, les autres la négative, ce sont les atomes des métalloïdes et des radicaux, tels que SO^4, et qu'à l'état de liberté ils sont enveloppés

d'une atmosphère de fluide contraire, neutralisant sans l'annuler l'électricité propre à chacun d'eux. Quand ces atmosphères disparaissent, deux atomes de nom contraire s'attirent électriquement et deviennent adhérents; alors ils sont combinés, et l'affinité qui les a réunis se réduit à n'être plus que l'attraction de leurs électricités. Si cette hypothèse était fondée, deux métalloïdes électro-négatifs tous deux ne pourraient point se combiner. Pour éviter cette objection, Berzelius admit que toute molécule est dissymétrique, qu'elle possède deux pôles opposés, et que la combinaison se fait quand deux de ces molécules se soudent par leurs extrémités de nom contraire; enfin M. de la Rive a précisé cette idée. Il donne des tensions polaires inégales aux atomes des divers corps, et il pose en principe, sans le justifier, qu'ils se combineraient par la réunion du pôle positif le plus fort avec le pôle négatif le plus faible; par exemple, le pôle négatif du soufre se réunirait au positif plus fort de l'oxygène pour former l'acide hyposulfureux, et ce serait le pôle positif de ce même soufre qui se joindrait au négatif plus faible de l'hydrogène dans l'hydrogène sulfuré. M. de la Rive explique ainsi toutes les combinaisons possibles ainsi que le renversement du rôle électrochimique d'un corps quand il s'unit avec un autre dont la tension polaire est plus grande ou plus faible que la sienne. On voit que l'embarras n'est pas d'inventer une constitution de la matière, qu'il est plutôt dans le choix qu'on doit faire entre celles qui ont été proposées. Toutes ces conceptions sont des jeux de l'imagination, et il n'est pas douteux qu'un esprit exercé à ce genre de spéculations ne puisse arriver à se satisfaire par des suppositions très-différentes et nombreuses. Du moment qu'on s'adresse à un problème aussi indéterminé, on peut le résoudre par un grand nombre de solutions possibles.

Sans s'embarrasser de ces atmosphères et de ces pôles qui rendent l'hypothèse invraisemblable et qui la compliquent inutilement en voulant la préciser, la majorité des physiciens paraît s'accorder pour admettre que les atomes *peuvent* s'électriser positivement ou négativement, suivant les cas, et qu'au moment de se combiner, deux d'entre eux se chargent toujours de quantités égales de fluides contraires. Le soufre serait négatif avec les métaux dans tous les sulfures, et positif avec

l'oxygène dans les acides sulfureux ou sulfurique. Mais les métalloïdes, et les radicaux tels que SO^4, seraient toujours négatifs dans les combinaisons qu'ils forment avec l'hydrogène ou les métaux. Comme ces combinaisons sont les seules dont l'électrolysation soit incontestable, ce sont aussi les seules qui doivent nous occuper. Dès lors, quand un composé tel que l'eau se forme, l'oxygène dégage de l'électricité positive et reste chargé négativement, l'hydrogène dégage de l'électricité négative en devenant positif, et les deux atomes, ainsi pourvus de quantités égales de fluides contraires, se réunissent en une seule molécule qui est neutre. Quand le composé ainsi formé se détruit, l'oxygène et l'hydrogène reprennent les électricités qu'ils avaient dégagées, savoir, le premier la positive, le second la négative, et ils repassent à l'état naturel.

Une fois qu'on a admis cette hypothèse, l'explication de l'électrolysation devient complète. En effet, c'est parce que l'oxygène est négatif et l'hydrogène positif que les molécules d'eau s'orientent d'abord quand le courant commence à passer. La tension devenant plus grande, les molécules se détruisent, leur oxygène avance d'un rang, leur hydrogène recule d'autant, de façon que le même nombre de molécules d'eau, moins une, se reconstitue, et que l'oxygène et l'hydrogène des molécules extrêmes s'échappent sur les électrodes où elles sont ramenées à l'état naturel.

Après chacune de ces décompositions et recompositions successives, les diverses parties du conducteur se retrouvent à l'état naturel, et les deux molécules d'oxygène et d'hydrogène qui se dégagent enlèvent aux deux pôles des quantités d'électricité égales et contraires à celles qu'elles avaient dans la molécule d'eau; donc, au bout d'un temps quelconque, la quantité d'électricité qui a passé mesure celle que les molécules possédaient quand elles étaient combinées. Or la loi de Faraday nous apprend que la même masse électrique dégage 1 équivalent du radical d'un électrolyte quelconque, par conséquent, « cet équivalent contient dans tous les électrolytes » une même quantité d'électricité négative, et le métal une » quantité égale de l'électricité opposée. » On interprète ainsi la loi de Faraday de la même manière que la loi de Dulong sur la chaleur spécifique des atomes.

Non-seulement l'hypothèse que nous venons d'admettre doit expliquer l'électrolysation, mais encore la production de l'électricité dans les couples des piles; c'est la question la plus délicate et la plus controversée de la physique. On a proposé trois théories que je vais exposer :

1°. Rien ne prouve qu'il n'y ait pas, au moment où deux corps se touchent, *une force électromotrice préexistante* qui les mettrait dans des états électriques différents, et qui serait variable avec leur nature. Si elle existait, voici ce qui arriverait dans un couple ordinaire :

Le circuit étant ouvert : le zinc se chargerait négativement, le liquide positivement, et l'équilibre aurait lieu quand la différence des tensions serait devenue égale à $2e$. Les pôles d'un couple ou d'une pile auraient donc des tensions permanentes; il n'y aurait point d'électrolysation, puisqu'il n'y aurait point de courant. Mais une action chimique inverse tendrait à se produire, car le zinc négatif attirerait l'hydrogène $\underset{+}{H}$ de l'eau acidulée et repousserait l'acide suroxygéné $\underset{-}{SO^4}$ dans le liquide. On voit en effet des bulles d'hydrogène adhérer au zinc, et M. Schœnbein a découvert que le liquide contient de l'eau oxygénée.

En fermant le circuit : on offrirait une issue aux électricités que la force électromotrice renouvellerait sans cesse; un courant parcourrait toutes les parties du circuit, celles qui sont extérieures à la pile comme les auges des couples eux-mêmes, et il produirait partout une électrolysation égale. Ainsi toutes les circonstances et toutes les lois expérimentales des courants s'expliquent par la théorie du contact.

2°. La deuxième théorie suppose *une force d'affinité préexistante* entre $\underset{+}{SO^4}$ et Zn. Si cette force existe, elle décomposera l'eau acidulée $\left(\underset{-}{SO^4}\underset{+}{H}\right)$; une molécule $\left(\underset{-}{SO^4}\right)$ qui est négative s'unira à une molécule de zinc; mais comme celle-ci doit être positive dans la combinaison qui se forme, elle laissera du fluide négatif sur la lame de zinc en se détachant d'elle. D'un autre côté, l'hydrogène $\underset{+}{H}$ sera mis en liberté au contact du zinc, il chargera positivement le liquide en se dégageant,

et les tensions augmenteront sur le zinc et dans le liquide à mesure que l'action chimique continuera. Mais celle-ci ne tardera pas à se limiter, car le zinc devenu négatif attirera l'hydrogène et repoussera le radical $\underset{-}{SO^4}$; un équilibre s'établira entre ces forces électriques et l'affinité, et les pôles, tant qu'ils seront isolés, demeureront chargés d'une tension limite persistante, grâce à une action chimique préalable.

En fermant le circuit, on offrira une issue aux électricités, la force d'affinité reprendra son énergie première, l'action chimique deviendra continue, le courant passera, et l'hydrogène se dégagera sur le cuivre à cause des décompositions successives qui auront lieu dans le liquide de molécule à molécule.

3°. Entre ces deux théories, qui ont partagé les physiciens pendant si longtemps, il y en a une troisième qui participe de l'une et de l'autre. On suppose qu'il existe une *tendance à la combinaison* entre $\underset{-}{SO^4}$ et le zinc, que cette force décompose le fluide naturel de Zn, attire le positif sur la partie immergée n et repousse le négatif à la partie extérieure Z; que toutes les molécules d'eau se polarisent et s'orientent, et que le cuivre Cu lui-même se charge par influence, négativement sur la surface immergée C et positivement sur les points u extérieurs au liquide.

$$\underset{-}{Z}\overline{}\underset{+}{n}\ \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \dots \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H} \mid \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H}\ \underset{-}{C}\overline{}\underset{+}{n}$$

Si le circuit reste ouvert, cet état de polarisation persiste indéfiniment; aussitôt qu'on le ferme, les électricités de Z et de C se recombinent, et comme leur présence agissait pour diminuer la tendance à la combinaison de $\underset{-}{SO^4}$ avec le zinc, leur disparition l'augmente jusqu'à la rendre efficace. Alors le premier atome de $\underset{-}{SO^4}$ s'unit à $\underset{+}{Zn}$, toutes les molécules d'eau se détruisent à la fois, d'autres se reforment suivant le mode ordinaire, et l'hydrogène se dégage sur le cuivre en lui enlevant de l'électricité négative.

Si l'on veut appeler les choses de leur vrai nom, cette *affinité de tendance* n'est rien qu'une force électromotrice préalable au contact des deux corps, et cette nouvelle théorie ne

diffère de la première que par un mot et par le mode de distribution électrique qu'elle admet, c'est-à-dire par des détails absolument en dehors de toute discussion, parce qu'ils sont au-dessus de tout contrôle. D'un autre côté, la différence entre la deuxième et la troisième théorie est bien légère, l'une admet entre $\underset{-}{SO^4}$ et $\underset{+}{Zn}$ une tendance à la combinaison, suffisante pour orienter les molécules et insuffisante pour les séparer, l'autre suppose que cette force est assez grande pour déterminer la combinaison tout d'abord.

Or nous verrons, dans un chapitre suivant, que des forces électromotrices existent au contact de certains corps sans qu'il y ait entre eux aucune action chimique *effectuée*, donc il faut que la force électromotrice préexiste, qu'elle provienne soit d'une cause physique, soit d'une tendance à la combinaison. Dès lors nous renoncerons à la théorie de l'action chimique préalable. D'un autre côté, comme tout nous autorise à penser que les phénomènes étudiés ici sont moléculaires, nous adopterons la dernière des hypothèses précédentes, non parce qu'elle constitue une théorie démontrée, mais parce qu'elle offre un moyen commode de lier les faits; ainsi nous admettrons :

1°. Qu'il y a une force électromotrice préexistante au contact d'un métal avec un liquide;

2°. Qu'elle oriente les molécules du liquide et développe des différences de tensions aux deux pôles quand le circuit est ouvert;

3°. Que le passage du courant dans les liquides du couple détermine l'électrolysation de ces liquides, c'est-à-dire les actions chimiques qui s'y accomplissent.

OXYGÈNE OZONÉ. — Ces théories reposent sur la possibilité d'électriser les atomes des corps. Un fait très-curieux paraît susceptible d'être rattaché à cette hypothèse. Van Marum avait reconnu que les étincelles électriques développent une odeur que l'on a comparée à celle du gaz nitreux, du phosphore ou du soufre, mais qui en réalité est spéciale et caractéristique. Ayant fait passer les étincelles dans un tube rempli d'oxygène, il trouva que ce gaz acquérait cette odeur et en même temps

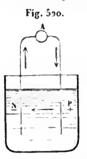
la faculté d'oxyder le mercure. Oubliées pendant longtemps, ces expériences ont été reprises par M. Schœnbein. Il reconnut que le gaz oxygène qui se dégage de l'eau qu'on électrolyse présente les mêmes caractères, et il les attribua à la formation d'une substance particulière qu'il nomma *ozone* et qu'il croyait être un suroxyde d'hydrogène. Depuis lors, les travaux de MM. de la Rive et Marignac, et ceux de MM. Fremy et E. Becquerel, ont fait voir que l'ozone est de l'oxygène dans un état allotropique spécial. On le produit, soit en électrolysant l'eau, soit en faisant passer des étincelles électriques au milieu de l'oxygène sec et pur, soit en dirigeant ce gaz sur du phosphore humide, soit en décomposant, d'après M. Houzeau, du bioxyde de barium par l'acide sulfurique à une basse température. Ainsi préparé, l'oxygène a des propriétés oxydantes très-énergiques : il se combine à froid avec les métaux, tels que l'argent, le cuivre, le mercure ; il transforme les acides sulfureux et hypoazotique en acides sulfurique et azotique ; enfin il décompose instantanément l'iodure de potassium et met l'iode en liberté, ce qui colore le liquide en jaune s'il est pur, et en bleu s'il est mêlé à l'amidon. En tout cas, l'oxygène ne peut, par aucun moyen, être entièrement ozonisé ; mais si on le maintient au-dessus d'un bain d'iodure de potassium et qu'on le soumette à une succession d'étincelles, il est absorbé aussitôt qu'il se transforme, et la totalité du gaz finit par disparaître. Toutes ces expériences prouvent que l'oxygène passe à un état particulier, et quelques personnes ont pensé qu'il est électrisé à l'état de liberté comme il l'est dans ses combinaisons.

Nous devions mentionner cette opinion, qui ne peut être démontrée vraie ni prouvée inexacte. M. Ozann a cru trouver à l'hydrogène provenant de l'électrolysation des propriétés analogues à celles de l'ozone. J'avais avant lui énoncé la même idée, mais je crois qu'il faut de nouvelles expériences avant de se prononcer sur ce point.

CAUSES D'AFFAIBLISSEMENT DES PILES.

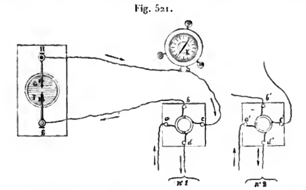
POLARISATION DES ÉLECTRODES. — Quand on fait passer le courant d'une pile A à travers un électrolyte quelconque (*fig.* 520), le radical se porte au pôle positif P et la base au pôle négatif N, et tous deux s'accumulent au voisinage des surfaces des électrodes. Si l'on vient ensuite à remplacer la pile A par un galvanomètre, ce radical et cette base se recombinent, le premier est positif en P, la seconde négative en N, et il se produit dans le sens PAN un courant contraire à celui qui a déterminé l'électrolysation. Ce phénomène était connu depuis longtemps; c'est M. Becquerel qui l'a expliqué par la réaction des éléments mis en liberté.

Fig. 520.



Pour rendre l'expérience plus aisée, nous ferons arriver le courant de la pile en a, dans un interrupteur $abcd$ (*fig.* 521);

Fig. 521.

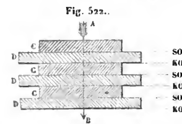


de là il passera par bE dans un vase à décomposition FG figuré déjà (page 64); il reviendra par un galvanomètre K, en c, en d et enfin à la pile. Quand le courant aura circulé pendant quelque temps, nous placerons l'interrupteur dans la position indiquée n° 2, le courant de la pile ira de a' en d' sans passer par l'électrolyte; mais la communication restera établie entre E et H par le fil E$b'c'$H et par le galvanomètre K : nous constaterons alors un courant qui est toujours opposé à celui de

la pile; il est très-énergique si le vase FG contient un sel alcalin, il existe encore, quoique plus faible, si on opère sur des acides et même sur l'eau pure.

Il est clair que le même effet ne ferait que se multiplier si, au lieu d'un seul vase à décomposition, on en mettait plusieurs à la suite l'un de l'autre, ou si on plaçait dans une même auge une série de cloisons métalliques successives; chacune d'elles fonctionnerait comme électrode, positive d'un côté et négative de l'autre; c'est à peu près ce que faisait Ritter. Il composait des piles inactives par elles-mêmes, en empilant des disques de cuivre CCC (*fig.* 522), séparés par des draps DDD imbibés d'une dissolution saline, par exemple de sulfate de potasse, et il les soumettait pendant un certain temps à l'action d'un courant AB; alors l'acide sulfurique se portait à la partie supérieure de tous les draps, la potasse à la partie inférieure; chacun de ces draps devenait un couple actif séparé du suivant par un conducteur métallique, et leur ensemble constituait une pile dont le pôle positif était en A et le négatif en B. En réunissant ces pôles par un conducteur, on avait par conséquent un courant opposé à AB, pendant tout le temps que l'acide et la potasse mettaient à se recombiner.

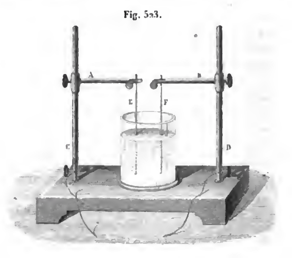
Fig. 522.



Pour justifier l'explication qu'il avait donnée, M. Becquerel fit les expériences suivantes : Il plongea d'abord dans du sulfate de potasse (*fig.* 523) deux lames de platine E et F, réunies entre elles par un galvanomètre, et il s'assura qu'elles ne produisaient aucun courant. Alors il les retira du liquide pour plonger, l'une dans l'acide sulfurique, l'autre dans la potasse, puis il les replaça dans le sulfate de potasse, et il reconnut qu'elles développaient un courant intense traversant le galvanomètre de l'acide à l'alcali. Pour varier l'expérience, il fit passer un courant à travers le sulfate de potasse par les lames E et F, et quand elles eurent été recouvertes par l'électrolysation d'une quantité suffisante de potasse et d'acide, il enleva le vase et le remplaça par un autre contenant une solution identique, mais qui n'avait point été préalablement élec-

trolysée: le même courant se produisit. Non-seulement ces

Fig. 523.



expériences prouvent que c'est à la réaction des éléments décomposés que le phénomène est dû, mais elles montrent encore qu'il faut l'attribuer, non pas à leur recomposition directe, mais à l'état particulier dans lequel ils mettent les lames de platine qui en sont revêtues. C'est pour exprimer ce fait qu'on dit qu'elles sont *polarisées*, et cela veut dire que le siége des forces électromotrices est placé sur elles. Tous les effets s'expliquent si on admet qu'au contact des acides ou des alcalis, le platine devient positif ou négatif, mais ils ne sont plus aussi évidents si on cherche l'origine du développement électrique dans la combinaison des deux corps, puisqu'ils ne se touchent point.

Lorsque l'électrolysation se fait sans produire aucune accumulation des éléments sur les électrodes, elles ne se polarisent pas, et il n'y a point de courant de réaction : c'est ce que l'on constate quand on décompose un sel avec deux lames du métal qui forme la base de ce sel, comme du sulfate de cuivre, de l'azotate d'argent ou du sulfate de zinc, par des lames de cuivre, d'argent ou de zinc, car l'action se réduit à un transport du métal de l'électrode positive à la négative; c'est ce que l'on remarque encore quand on électrolyse l'acide azotique étendu par deux fils de cuivre ou de zinc amalgamé, car l'oxygène se

combine avec le pôle positif qui se dissout, et l'hydrogène est absorbé dans l'acide qui est réduit au pôle négatif. Mais quand on a décomposé l'eau acidulée ou même l'eau pure avec des électrodes de platine, elles donnent des courants secondaires. Au premier abord il paraît difficile d'appliquer à ce cas l'explication précédente, parce que les éléments séparés sont des gaz qui paraissent se dégager en totalité, et aussi parce qu'ils n'ont pas la propriété directe de se combiner l'un à l'autre. Cependant la vérité de cette explication est pleinement démontrée.

M. Becquerel a d'abord prouvé que les deux électrodes qui ont servi à la décomposition de l'eau sont capables de produire un courant quand on les plonge dans un liquide conducteur qui n'a pas été primitivement électrolysé. M. Matteucci a été plus loin: il a fait séjourner deux lames de platine, l'une dans l'oxygène, l'autre dans l'hydrogène, et, au bout de dix minutes, il les a trouvées polarisées comme si elles avaient servi à la décomposition de l'eau. Voulant constater ensuite qu'elles avaient absorbé et condensé des gaz, il introduisit celle qui avait été polarisée par l'oxygène dans une petite cloche pleine d'hydrogène, elle y produisit une diminution de volume notable, ce qui prouve non-seulement qu'elle avait gardé de l'oxygène, mais qu'elle lui avait donné la propriété qu'il ne possède pas naturellement de se combiner avec l'hydrogène. Tous ces faits sont confirmés enfin par de nombreux travaux de M. Schœnbein, et en particulier par l'expérience qui suit. On fait passer dans les deux branches d'un tube en U plein d'eau deux courants gazeux, l'un d'oxygène, l'autre d'hydrogène, soit en les y amenant par des tubes de verre, soit en les y dégageant par un courant avec deux électrodes de platine. Après quelque temps, l'eau a dissout dans chaque branche une proportion déterminée de ces gaz, et si l'on y plonge deux lames de platine réunies par un galvanomètre, elles accusent un courant dans le même sens que précédemment.

Deux points importants résultent du travail de M. Matteucci: 1° la faculté que possède le platine de condenser l'hydrogène et l'oxygène; 2° la propriété acquise par ces gaz condensés de se combiner directement, l'un avec l'hydrogène, l'autre avec l'oxygène, d'où il suit qu'une lame de platine introduite dans le mélange détonant de ces deux gaz doit déterminer la forma-

tion de l'eau. C'est en effet ce qui se passe avec l'éponge de platine, comme Dobereiner l'a découvert, et c'est aussi ce qui a lieu avec le platine laminé quand il est bien décapé, ainsi que M. Faraday l'a constaté.

Dans le cours des recherches qu'il fit sur le voltamètre, M. Faraday eut l'occasion de recueillir les deux gaz dans une cloche unique qui recouvrait à la fois les deux électrodes. Quand elle fut pleine et que les électrodes furent tout entières dans le gaz, il interrompit le courant. Alors l'oxygène et l'hydrogène commencèrent à se recombiner et à reproduire de l'eau. M. Bertin a constaté depuis que cette recomposition se produisait même pendant le passage du courant et faisait détoner le mélange quand la pile avait une cinquantaine de couples.

M. Faraday étudia séparément les propriétés de chacune des électrodes après qu'elles avaient servi pendant dix minutes à l'électrolysation de l'eau. A cet effet, il les lavait à l'eau distillée, les essuyait et les plongeait dans un mélange détonant. La négative était à peu près sans action, mais la positive déterminait une recomposition des gaz, d'abord lente, ensuite assez rapide pour faire disparaître deux pouces cubes du mélange en une minute, toujours accompagnée d'une augmentation de température qui allait jusqu'à faire bouillir l'eau et se ralentissant ensuite pour devenir nulle au bout de quelques jours. Une action tout à fait pareille se produit avec un mélange de deux gaz quelconques pouvant donner lieu à des combinaisons stables. En résumé, cette électrode a toutes les propriétés que M. Kuhlmann a reconnues à l'éponge de platine et elle les conserve pendant longtemps quand on la maintient plongée dans l'eau où elle a été préparée ou dans une solution de potasse.

On peut rendre actives par un tout autre procédé des lames de platine, d'or et de palladium, mais non d'argent et de cuivre, en les lavant avec soin dans la potasse ou dans l'acide sulfurique, ou en les chauffant jusqu'au rouge enveloppées de potasse caustique; et comme ces divers traitements ne sont que des procédés de décapage plus ou moins complets, l'activité des lames paraît résulter, non d'un état électrique particulier, mais de la netteté des surfaces qui leur permet de

condenser les gaz en plus grande proportion et de déterminer ainsi la combinaison lente d'un mélange détonant.

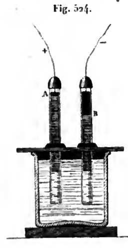
Tous ces faits s'expliquent si on admet qu'au moment où ils se condensent sur le platine, l'or ou le palladium, les gaz prennent, l'oxygène l'électricité négative, l'hydrogène la positive pendant que les métaux se chargent inversement. Alors un couple de deux électrodes polarisées par l'oxygène et l'hydrogène produirait une orientation des molécules intermédiaires comme il suit :

$$\mathrm{Pt}\underset{+}{\text{———}}\underset{-}{\mathrm{O}}\,\Big|\,\underset{+}{\mathrm{H}}\;\underset{-}{\mathrm{O}}\,\Big|\,\underset{+}{\mathrm{H}}\;\underset{-}{\mathrm{O}}\,\Big|\;\cdots\;\Big|\,\underset{+}{\mathrm{H}}\;\underset{-}{\mathrm{O}}\,\Big|\,\underset{+}{\mathrm{H}}\;\underset{-}{\mathrm{O}}\,\Big|\,\underset{+}{\mathrm{H}}\underset{-}{\text{———}}\mathrm{Pt'}$$

Au moment où on réunirait les lames de platine par un conducteur extérieur, un courant traverserait ce conducteur de Pt à Pt' et le liquide de Pt' à Pt; toutes les molécules d'eau seraient décomposées et il s'en reformerait le même nombre plus une, comme cela est figuré par les accolades. Cette action se reproduira indéfiniment s'il y a toujours du gaz oxygène autour de Pt et de l'hydrogène autour de Pt'. C'est ce qui conduit naturellement à la pile à gaz de M. Grove.

PILE A GAZ. — Un voltamètre (*fig.* 524) peut devenir un couple à gaz, si l'on a primitivement fait dégager 1 volume d'oxygène dans A et 2 volumes d'hydrogène dans B. Ces gaz restent indéfiniment dans le même état si le circuit est ouvert, mais ils se combinent et disparaissent en totalité si l'on réunit les fils des deux cloches, et ils produisent un courant de A en B. Ce courant augmente en intensité quand on a soin d'employer des lames de platine larges et recouvertes de platine pulvérulent qu'on dépose par la galvanoplastie.

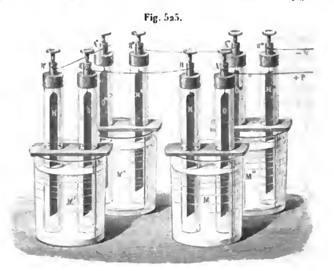
Fig. 524.



Un seul couple est suffisant pour décomposer l'iodure de potassium. Si l'on en réunit 20 ou 30, on forme une pile plus énergique

(*fig.* 525), et la recomposition des molécules d'oxygène et

Fig. 525.



d'hydrogène se fait dans chaque couple, comme nous l'avons expliqué pour un seul et comme cela est représenté *fig.* 526.

Fig. 526.



Cette pile peut décomposer l'eau dans un voltamètre extérieur, et l'on remarque alors qu'il se dégage dans ce voltamètre une quantité de gaz égale à celle qui disparaît dans chaque élément de la pile. C'est la plus élégante démonstration expérimentale de la loi d'égalité du travail chimique dans les auges de la pile et du circuit.

RÉSISTANCE AU PASSAGE. — La polarisation des électrodes explique un fait qui a été découvert par M. de la Rive et étudié ensuite par un grand nombre de physiciens. Ayant interposé un diaphragme de platine dans une auge traversée par un courant, M. de la Rive vit diminuer peu à peu l'intensité de ce

courant jusqu'à une limite fixe, absolument comme si le métal opposait une *résistance au passage* de l'électricité, résistance qui croîtrait peu à peu jusqu'à une valeur qui resterait ensuite constante.

Pour expliquer ce phénomène, rappelons que si on fait passer le courant d'une pile A (*fig.* 520) dans du sulfate de potasse, l'acide et l'alcali se portent aux pôles +P et −N, et qu'ils constituent alors un couple dont le sens est opposé à celui de la pile et qui produit le courant de réaction. Il est naturel de penser que ce couple agit non-seulement quand le courant de la pile cesse, mais encore pendant tout le temps qu'il circule, et que, par conséquent, les choses se passent comme si l'on ajoutait à la pile A un couple de plus, mais placé à l'inverse des autres.

Si donc on dirige un courant à travers une auge à liquide, on fait naître une première force électromotrice inverse. Quand on interpose, dans ce liquide, un diaphragme métallique, il agit comme électrode positive par une face, comme électrode négative par l'autre; l'auge se décompose en deux autres; la même force électromotrice se développe dans toutes les deux, et si l'on multiplie le nombre des diaphragmes, on ne fait que multiplier le nombre des couples de la pile inverse et les causes d'affaiblissement du courant primitif. C'est ce qui se produit dans la pile de Ritter: aussi voit-on qu'elle affaiblit peu à peu et considérablement le courant qu'on dirige à travers elle, et quand il est devenu sensiblement constant, il est la différence entre ceux que produiraient séparément dans le même circuit la pile active que l'on emploie et la pile de Ritter rendue active par la première.

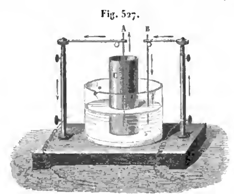
La résistance au passage est nulle dans tous les voltamètres où les électrodes ne se polarisent pas : par exemple, quand on décompose du sulfate de cuivre par deux lames de cuivre, ou du sulfate de zinc par deux lames de zinc, ou de l'acide azotique étendu par deux fils de cuivre; dans ces divers cas et dans tous les autres analogues on peut interposer dans l'auge un nombre quelconque de diaphragmes sans diminuer l'intensité du courant d'une manière notable.

Si un seul gaz s'accumule à l'une des électrodes pour la polariser, il produit une résistance propre; c'est ce qui arrive dans

la décomposition de l'acide azotique par le platine où l'oxygène seul polarise la lame positive; c'est ce qui arrive aussi quand on électrolyse l'eau acidulée avec deux lames de cuivre, auquel cas l'hydrogène seul polarise la lame négative.

Enfin la résistance se produit individuellement sur chaque électrode quand chacune d'elles se polarise. C'est ce qu'on peut montrer comme il suit : On place du sulfate de cuivre à l'intérieur du vase poreux C (*fig.* 527) et de l'eau acidulée à

Fig. 527.



l'extérieur. Quand les électrodes A et B sont en platine et que le courant passe de B en A, l'oxygène se développe dans l'eau acidulée, le cuivre se dépose sur A; il n'y a qu'un gaz dégagé, qu'une polarisation, et le courant est intense; mais quand on change sa direction au moyen d'un commutateur, l'oxygène se dégage en A, l'hydrogène en B, il y a deux gaz mis en liberté, deux polarisations, deux résistances au passage et le courant est beaucoup plus faible.

Puisque chacun des gaz détermine une résistance au passage, il est nécessaire d'admettre que chacun d'eux développe dans son contact avec les électrodes une force électromotrice indépendante des actions chimiques qu'il produit et opposée à celle de la pile; il faut donc que cette force électromotrice soit un phénomène de contact. Nous développerons cet argument dans la suite; pour le moment nous allons nous contenter de montrer comment les résistances au passage affaiblissent le courant des piles et comment en les détruisant on augmente l'intensité de ce courant.

PILES A COURANT CONSTANT. — Dans toutes les piles que nous avons fait connaître et dont nous avons déjà éliminé le travail inefficace par la substitution du zinc amalgamé au zinc du commerce, il y a trois causes qui affaiblissent le courant : 1° des bulles d'hydrogène se dégagent sur les lames de cuivre; elles s'interposent entre les éléments, et, puisqu'elles sont isolantes, elles diminuent la conductibilité de la pile, d'autant plus qu'elles adhèrent davantage et qu'elles sont plus grosses; 2° l'hydrogène naissant est condensé par la surface du métal et produit une résistance au passage de l'électricité; 3° l'acide sulfurique se transforme partiellement en sulfate de zinc. Ce sel devient de plus en plus abondant; il finit par être électrolysé par le courant et par déposer sur les cuivres une couche de zinc d'autant plus épaisse, qu'on prolonge davantage le travail de la pile, et qui détermine elle-même par sa réaction un courant inverse. Daniell a constaté que ce dépôt peut devenir tellement épais, que les cuivres ne diffèrent plus des zincs et qu'alors la pile a perdu toute activité; une fois qu'il est formé, il ne se détruit pas, même quand on change le liquide des auges, et l'appareil étant altéré d'une manière permanente, il faut le démonter pour le nettoyer, ou bien faire passer du cuivre au zinc, dans chaque élément, le courant d'une pile énergique; dans ce cas l'eau acidulée est décomposee, SO^4 se porte sur le cuivre et dissout le dépôt dont il était recouvert.

Il est facile de diminuer l'obstacle mécanique opposé au courant par l'interposition des bulles d'hydrogène, en facilitant leur dégagement. Smée y est parvenu en remplaçant le cuivre ordinaire par du cuivre platiné, c'est-à-dire recouvert par la galvanoplastie d'une couche noire de platine pulvérulent, lequel a la propriété de laisser dégager l'hydrogène en bulles très-petites et qui n'adhèrent jamais. Sturgeon a proposé une modification analogue et moins coûteuse, qui consiste à remplacer le cuivre par de la fonte de fer oxydée. Mais ces perfectionnements n'empêchent pas les polarisations provenant soit du dégagement d'hydrogène, soit du dépôt de zinc. C'est M. Becquerel qui le premier a découvert le moyen d'annuler totalement ces polarisations.

Reprenons l'expérience déjà indiquée page 96 (*fig.* 527), faisons passer un courant de B en A, c'est-à-dire de l'eau aci-

dulée qui est à l'extérieur au sulfate de cuivre qui remplit le vase poreux C. La décomposition se fera comme il suit dans les deux liquides :

$$B\underset{+}{\text{—}}\underset{-}{SO^4}\,\overbrace{\underset{+}{H}\,\Big|\,\underset{-}{SO^4}}\,\underset{+}{H}\,\Big|\cdots\Big|\,\underset{-}{SO^4}\,\overbrace{\underset{+}{H}\,\Big\|\,\underset{-}{SO^4}}\,\underset{+}{Cu}\,\Big|\cdots\Big|\,\underset{-}{SO^4}\,\overbrace{\underset{+}{Cu}\,\Big|\,\underset{-}{SO^4}}\,\underset{+}{Cu}\underset{-}{\text{—}}A$$

Le cuivre se déposera sur le pôle négatif A, $\underset{-}{SO^4}$ se portera au pôle positif B, il n'y aura qu'une polarisation en B; il y en aurait deux, au contraire, si le courant marchait en sens inverse, et il serait beaucoup plus faible. Supposons maintenant que B soit formé avec une lame de zinc amalgamé Z, il y aura une force électromotrice en Z; au premier moment, et tant que le circuit restera ouvert, les molécules seront orientées comme il suit :

$$Z\underset{-\qquad+}{\text{———}}\underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H}\,\Big|\,\underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H}\,\Big\|\,\underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{Cu}\,\Big|\,\underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{Cu}\underset{-\qquad+}{\text{———}}A$$

et quand on réunira Z à A par un conducteur, un courant se produira à l'extérieur de A en Z, reviendra intérieurement de Z à A, et produira la même décomposition que précédemment; l'appareil deviendra un couple de pile et il n'y aura aucune polarisation d'électrodes, car il ne se dégagera aucun gaz.

Remplaçons maintenant le sulfate de cuivre par de l'acide azotique, l'effet sera le même :

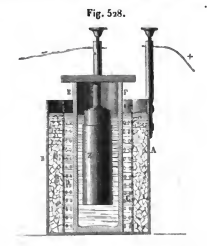
$$Z\underset{-+}{\text{—}}\underset{-}{SO^4}\,\overbrace{\underset{+}{H}\,\Big|\,\underset{-}{SO^4}}\,\underset{+}{H}\,\Big|\cdots\Big|\,\underset{-}{SO^4}\,\overbrace{\underset{+}{H}\,\Big\|\,\underset{-}{AzO^6}}\,\underset{+}{H}\,\Big|\cdots\Big|\,\underset{-}{AzO^6}\,\overbrace{\underset{+}{H}\,\Big|\,\underset{-}{AzO^6}}\,\underset{+}{H}\underset{-+}{\text{—}}Pt$$

La force électromotrice agira au contact du zinc et de l'eau acidulée, l'hydrogène se portera sur le platine et il ne se dégagera pas parce qu'il sera absorbé par l'acide azotique. Tels sont les moyens proposés par M. Becquerel pour détruire toute polarisation dans les couples. Ils ont été appliqués par MM. Daniell, Grove et Bunsen. Nous n'avons plus qu'à décrire les appareils construits par ces physiciens.

Le couple de Daniell (*fig.* 528) se compose : 1° d'un vase en cuivre AB divisé en deux compartiments concentriques par une feuille de cuivre CD percée de trous : on remplit le compartiment extérieur avec des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent a mesure que la décomposition du sel se fait;

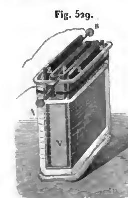
2° d'un vase poreux de porcelaine dégourdie EF, qui contient

Fig. 528.



de l'eau acidulée; 3° d'un gros cylindre de zinc amalgamé Z, qui plonge dans cette eau et qui communique à l'extérieur par une tige de cuivre centrale. Cet appareil réalise évidemment les conditions que nous venons d'énumérer. Il faut de temps en temps changer l'eau acidulée du vase poreux. Daniell a constaté que sa pile demeurait constante pendant plus de six heures.

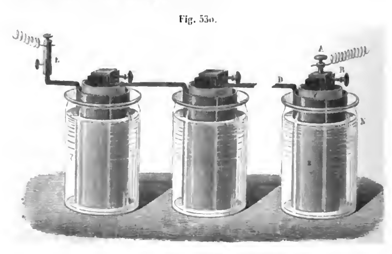
Fig. 529.



L'élément de Grove est représenté *fig.* 529, il est enfermé dans un vase de verre aplati contenant de l'eau acidulée. Une lame de zinc amalgamé ZZ, repliée sur elle-même et portant un bouton B, forme le pôle négatif. Le vase poreux V, qui est très-plat, est placé entre les deux faces internes du zinc; il contient de l'acide azotique concentré; enfin une feuille très-mince de platine P, qui communique avec le bouton A, forme le pôle positif. Cette pile est la plus énergique qu'on connaisse, mais elle est très-coûteuse à cause du platine qu'elle exige.

M. Bunsen a imaginé de remplacer le platine par du charbon, et par là il a rendu la pile de Grove beaucoup plus usuelle. La *fig.* 530 montre plusieurs couples de cette pile montés avec tous leurs accessoires.

Fig. 530.



SOIXANTE-SIXIÈME LEÇON.

THÉORIE PHYSIQUE DES PILES.

Égalité du courant dans toute la longueur du circuit. — Cas des couples thermo-électriques. — Lois des intensités dans un circuit simple. — Conducteurs équivalents. — Longueurs réduites. — Résistances. — Circuits complexes. — Circuits dérivés. — Cas des couples hydro-électriques. — Cas général des piles. — Discussion de la formule. — Divers modes d'association des couples. — Sensibilité des galvanomètres. — Théorie de Ohm. — Tension aux divers points d'un circuit. État primitif des tensions variables. — Ce qu'on entend par vitesse de l'électricité.

Quand on réunit les pôles d'une pile par un conducteur composé de parties métalliques et liquides dont les conditions sont invariablement fixées, on obtient un courant d'une intensité déterminée. Mais si on vient à ajouter une portion métallique ou liquide à ce conducteur, ou bien à la supprimer, on voit l'intensité diminuer ou augmenter. Cela montre que les corps traversés par l'électricité lui opposent une résistance et en diminuent la quantité. On va se proposer de calculer l'intensité du courant engendré quand on connaît : 1° le nombre, l'étendue et l'espèce des éléments de la pile ; 2° le nombre, l'étendue et l'espèce des conducteurs interpolaires.

Ce problème est un des plus utiles qu'on ait pu se proposer, et un de ceux qui ont été le mieux résolus. Davy commençait cette étude en 1821, et admettait que la résistance d'un conducteur est en raison directe de sa longueur et inverse de sa section ; en 1825, M. Becquerel confirmait cette loi par le moyen du galvanomètre différentiel qu'il inventait à cette occasion, et enfin, en 1827, Ohm traita complétement la question et la résolut tout entière en partant de cette idée théorique, que l'électricité se propage dans les conducteurs comme la chaleur dans un mur ; ensuite il vérifia par l'expérience quelques-uns

des résultats où son hypothèse l'avait conduit, mais ce ne fut qu'en 1831 que Fechner continua ces vérifications par des procédés qui n'avaient pas une grande précision. Jusque-là, la question avait été toute théorique, et comme l'expérience n'était intervenue que pour justifier incomplétement les conséquences d'hypothèses heureuses, on ne doit point s'étonner que des travaux si importants aient eu quelque peine à se faire accepter. Ils étaient complétement inconnus en France, lorsqu'en 1838 M. Pouillet retrouva toutes les lois de Ohm par la seule étude expérimentale des piles et sans faire appel à aucune considération théorique. Il est donc incontestable que c'est à Ohm qu'on doit d'avoir prévu et énoncé le premier les résultats que nous allons exposer, mais il faut s'empresser d'ajouter que M. Pouillet les a fait admettre en les appuyant sur des démonstrations expérimentales irrécusables.

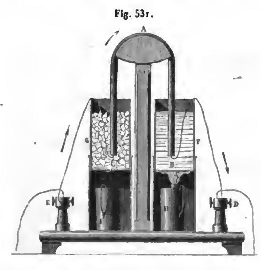
Ce point historique une fois réglé, nous sommes libres de choisir la méthode d'exposition qui nous paraîtra la plus simple; en conséquence, nous traiterons la question expérimentalement; nous donnerons ensuite un aperçu des idées théoriques de Ohm.

La première loi que l'on doive constater en commençant cette étude, est que l'intensité du courant est la même dans toute l'étendue du circuit, la pile comprise; c'est une conséquence manifeste de tous les faits que nous venons d'étudier. En effet, nous avons vu que l'intensité d'un courant se mesure par le nombre des équivalents qu'il décompose dans chaque auge, et comme ce nombre est le même dans les voltamètres extérieurs et dans chaque couple actif, il faut que le courant ait partout la même force. On peut néanmoins justifier cette conclusion par une épreuve directe très-précise pour ce qui concerne le courant extérieur à la pile. On fixe aux deux pôles deux fils métalliques de longueur, de section et de nature différentes; on les tend horizontalement sur une table dans le méridien magnétique, aussi près l'un de l'autre que possible, puis on réunit leurs extrémités libres de manière que le courant aille par l'un et revienne en sens inverse par l'autre. On approche ensuite une aiguille aimantée très-près de ce double conducteur. En quelque endroit qu'on la place, on reconnaît qu'elle n'est pas déviée et que le nombre des oscillations

qu'elle effectuait avant le passage du courant n'est point modifié quand ce courant circule; on en conclut que l'intensité est la même dans tous les points du conducteur opposés l'un à l'autre.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES. — Cela étant, nous allons choisir parmi toutes les piles celles qui conduisent aux lois les plus simples; nous commencerons ainsi par un cas particulier, et il nous restera à généraliser ce que nous aurons découvert, ce que nous ferons, en étudiant successivement toutes les causes de complication qui pourront se présenter. Ce cas particulier est celui où le courant est fourni par un élément unique d'une pile thermo-électrique. M. Pouillet avait préparé à cet effet plusieurs cylindres de bismuth identiques, recourbés en siphons et présentant la forme d'un U renversé (*fig.* 531). A leurs

Fig. 531.



extrémités C et B il soudait deux fils de cuivre gros et courts, CE et BD, et il plongeait les deux soudures dans deux vases, G et F, dont l'un était maintenu à 0 degré, et dont l'autre était porté à la température de 100 degrés. Il est évident que l'énergie de tous ces éléments devait être sensiblement égale, ce qui en effet se trouva vrai.

M. Pouillet choisit deux de ces éléments, ceux qui différaient

le moins, et il ferma les deux circuits par des fils métalliques différents : les courants produits furent inégaux; il les compara, et, pour étudier successivement les diverses causes qui les modifient, il fit varier successivement, 1° la longueur; 2° la section; 3° la matière des conducteurs.

1°. Réunissons les deux pôles de l'élément n° 1 par un fil de cuivre d'une longueur l_1, et ceux de l'élément n° 2 par un second fil de même nature, de même section et de longueur l_2; enroulons ces fils en sens inverse sur le cadre d'un même galvanomètre, de manière à faire un nombre de tours proportionnel à l_1 pour le premier et à l_2 pour le second. Les actions exercées sur l'aiguille seront opposées et proportionnelles aux produits des intensités I_1 et I_2 par le nombre des tours l_1 et l_2; or l'expérience prouve qu'elles se détruisent et que le galvanomètre ne se dévie pas. Il faut donc que l'on ait

$$I_1 l_1 = I_2 l_2 \qquad \text{ou} \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Par conséquent les intensités des courants engendrés par un couple thermo-électrique sont, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse des longueurs du circuit.

2°. Répétons la même expérience avec deux fils de même nature, égaux en longueur, ayant des sections différentes, s_1, s_2, et enroulés de même sur le cadre ; nous trouverons que pour rendre égales les deux actions exercées sur l'aiguille, il faut que les nombres de tours soient proportionnels à s_2 pour le premier et à s_1 pour le second, ou que l'on ait

$$I_1 s_2 = I_2 s_1, \qquad \frac{I_1}{I_2} = \frac{s_1}{s_2}.$$

Les intensités sont donc, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelles aux sections du circuit.

3°. Il reste à faire varier la nature du fil, c'est-à-dire à fermer le circuit des deux éléments par des conducteurs égaux en longueur et en section, mais formés avec des matières différentes. Cette fois encore les intensités sont inégales et proportionnelles à une constante spécifique c. En réunissant les résultats de ces recherches dans une formule unique, on exprime l'in-

tensité par

$$I = A\frac{cs}{l}.$$

c est le *coefficient de conductibilité* du métal qui constitue le conducteur; on l'exprime en nombre par le rapport de cette conductibilité à celle d'un métal convenu, qui est le cuivre pur ou le mercure. A ne dépend que de l'élément, de la nature des métaux qui le composent et de la différence de température qu'on établit entre les deux soudures : c'est l'intensité du courant quand c, s et l sont égaux à l'unité : c'est la mesure de la *force électromotrice* du couple. Si l'on convient, comme nous l'avons fait, d'exprimer l'intensité par le poids de l'hydrogène dégagé dans un voltamètre pendant 1 minute, A est le poids de cet hydrogène dégagé pendant ce temps par le couple donné, quand c, s et l sont égaux respectivement à l'unité. Nous nous occuperons dans la suite des moyens que l'on emploie pour déterminer c et A.

CONDUCTEURS ÉQUIVALENTS. — LONGUEUR RÉDUITE. — RÉSISTANCE. — Lorsque deux fils différents par leurs longueurs l, l', leur section s, s', et leur conductibilité c, c', sont joints aux deux extrémités d'un même couple, les intensités sont

$$I = A\frac{cs}{l}, \quad I' = A\frac{c's'}{l'},$$

et elles deviennent égales si les deux fils sont tels, que l'on ait

$$\frac{cs}{l} = \frac{c's'}{l'}.$$

Dans ce cas l'un des fils peut remplacer l'autre; on dit qu'ils sont *équivalents* ou qu'ils ont la même conductibilité totale. Cette propriété est inhérente aux fils eux-mêmes, elle est indépendante de la force électromotrice A, par conséquent du couple, et elle doit subsister, même si on les intercale dans un circuit quelconque d'une pile quelconque.

Si les deux fils sont de même nature, la condition d'équivalence se réduit à $\frac{s}{l} = \frac{s'}{l'}$: c'est la loi de Davy, et M. Bec-

querel l'a établie directement. Il mettait en communication le pôle positif d'une pile avec deux conducteurs Pa, Pb (*fig.* 532), qu'il joignait aux deux fils d'un galvanomètre différentiel. Le courant total se partageait entre eux et revenait par a' et b' dans un tronc unique CN jusqu'au pôle négatif N. On allongeait ou l'on diminuait l'un des fils Pa et Pb jusqu'à ce que l'action galvanométrique fût nulle, et quand elle l'était devenue, on en concluait que les deux conducteurs étaient équivalents. On trouva que la condition $\frac{s}{l} = \frac{s'}{l'}$ était toujours réalisée.

Fig. 532.

Si nous posons $c' = 1$, $s' = 1$, $l' = R$, la relation précédente devient

$$\frac{cs}{l} = \frac{1}{R}.$$

Cela veut dire qu'on peut toujours remplacer un fil c, s, l par un fil normal dont la conductibilité et la section seraient égales à l'unité, et la longueur à R, pourvu qu'on ait

$$R = \frac{l}{cs}; \tag{1}$$

R se nomme la *longueur réduite* du conducteur. Alors la formule qui exprime l'intensité du courant se réduit à

$$I = \frac{A}{R}. \tag{2}$$

Elle montre que l'intensité est en raison inverse de la longueur réduite R. A cause de cela, R s'appelle la *résistance* du conducteur.

Les formules (1) et (2) résument toutes les lois des courants engendrés par un couple thermo-électrique; il n'y a plus qu'à les appliquer pour résoudre les problèmes plus complexes qu'on peut se proposer. Nous en traiterons deux comme exemples de tous les autres.

I. CIRCUITS COMPLEXES. — Les pôles A et B d'un couple sont

réunis par plusieurs fils successifs a, a', a'', a''' de nature, de section et de longueurs différentes. Quelle est l'intensité du courant (*fig.* 533)?

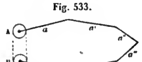


Fig. 533.

Soient cls, $c'l's'$, $c''l''s''$,..., les données relatives à chacun des fils a, a', a'',...; ceux-ci peuvent être remplacés par leurs longueurs réduites r, r', r'',

$$r=\frac{l}{cs},\quad r'=\frac{l'}{c's'},\quad r''=\frac{l''}{c''s''},\dots:$$

après cette substitution, le circuit se composera d'une suite de conducteurs qui auront la même section, la même conductibilité et une longueur totale $r+r'+r''$,...; par suite l'intensité sera

$$\mathrm{I}=\frac{\mathrm{A}}{r+r'+r''+\dots}=\frac{\mathrm{A}}{\frac{l}{cs}+\frac{l'}{c's'}+\frac{l''}{c''s''}+\dots}.$$

II. **CIRCUITS DÉRIVÉS.** — Les deux pôles A et B sont réunis (*fig.* 534) : 1° par deux fils AC et BD dont la longueur réduite

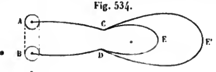


Fig. 534.

est r; 2° à partir de C et de D par deux autres conducteurs CED et CE'D, dont les longueurs réduites sont r' et r'' : quels sont les intensités des courants, 1° dans le tronc unique AC et BD; 2° dans chacune des branches CED et CE'D?

Remplaçons r' et r'' par deux fils équivalents de conductibilité et de longueur égales à l'unité, et de sections x et x', nous aurons, d'après la formule (1),

$$r'=\frac{1}{x},\quad r''=\frac{1}{x'},$$

les deux fils CED, CE'D se trouveront ainsi remplacés par deux autres qui auront la même longueur et qui agiront comme un

conducteur unique, dont la section serait $x+x'$:

$$x+x'=\frac{1}{r'}+\frac{1}{r''}=\frac{r'+r''}{r'r''},$$

et qui aurait pour longueur réduite $\frac{l}{cs}=\frac{1}{x'+x''}$ ou $\frac{r'r''}{r'+r''}$.
En ajoutant à cette longueur celle de AC et BD qui est r, on n'a plus qu'un circuit unique dont la longueur réduite totale est

$$r+\frac{r'r''}{r'+r''}.$$

Alors l'intensité du courant devient par la formule (2)

$$\text{I}=\frac{\text{A}(r'+r'')}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

Quant aux intensités i' et i'' dans les deux conducteurs dérivés CED et CE'D, on les obtient en admettant que l'intensité totale se partage en deux autres proportionnellement aux sections x et x''. Cela donne

$$\frac{i'}{i''}=\frac{x'}{x}=\frac{r''}{r'},$$

$$i'=(i'+i'')\frac{r''}{r'+r''}=\frac{\text{A}r''}{r(r'+r'')+r'r''},$$

$$i''=(i'+i'')\frac{r'}{r'+r''}=\frac{\text{A}r'}{r(r'+r'')+r'r''}.$$

On résoudrait tout aussi aisément le cas général où il y aurait un nombre quelconque de dérivations.

COUPLE HYDRO-ÉLECTRIQUE. — Si on cherche à découvrir, par les mêmes méthodes, les lois des courants engendrés par un couple hydro-électrique constant, on reconnaît aussitôt que l'intensité n'est pas en raison inverse de la longueur réduite R du circuit extérieur; elle décroît moins rapidement que cette loi ne l'indique, quand R augmente. Cela n'a rien qui doive nous étonner. Le courant part en effet des points de contact du zinc avec l'eau acidulée; il y revient après avoir parcouru, non-seulement le conducteur interpolaire, mais les liquides du couple, et il

éprouve une résistance à travers tous les deux : celle du conducteur est R, celle du liquide est inconnue; mais il est certain qu'elle existe, qu'elle dépend de la nature du couple et qu'elle est équivalente à la résistance d'une certaine longueur r d'un fil normal. Dès lors le circuit total est en réalité égal à $R + r$, et la formule des intensités doit être

$$I = \frac{A}{R+r}. \tag{3}$$

Il ne s'agit plus que de démontrer l'exactitude de ces prévisions, en prouvant par l'expérience que la formule précédente est vraie. A cet effet, M. Pouillet se servit d'un couple de Daniell, auquel il adapta successivement des longueurs o, λ', λ'', λ''',..., d'un fil de cuivre normal, et une boussole des tangentes dont la résistance était λ, et qui mesurait dans chaque cas les intensités I, I', I'',.... On devait avoir, en remplaçant R par ses diverses valeurs,

$$I = \frac{A}{r+\lambda}, \quad I' = \frac{A}{r+\lambda+\lambda'}, \quad I'' = \frac{A}{r+\lambda+\lambda''}, \ldots,$$

et en éliminant A,

$$\frac{I}{I'} = \frac{r+\lambda+\lambda'}{r+\lambda}, \quad \frac{I}{I''} = \frac{r+\lambda+\lambda''}{r+\lambda}, \ldots.$$

Ces dernières équations ont permis de calculer un grand nombre de valeurs de $r + \lambda$; elles sont inscrites dans le tableau suivant, et comme elles sont égales, on en conclut que la formule (3) représente la loi des intensités après qu'on y a remplacé r par la résistance du liquide.

LONGUEUR DU CIRCUIT extérieur.	DÉVIATION OBSERVÉE.	$r + \lambda$	DÉVIATION calculée.
m	o	m	o
0	62,00	"	62,00
5	40,20	4,11	40,18
10	28,30	4,06	28,41
40	9,45	4,03	9,36
70	6,00	4,14	5,37
100	4.15	4,09	4,14

En résumé, la loi des intensités des courants est la même pour les couples thermo-électriques et hydro-électriques, avec cette différence que pour ceux-ci, il faut tenir compte de la résistance r de l'élément, et que cela n'est pas nécessaire pour ceux-là. Cela n'est pas nécessaire, parce que le cylindre de bismuth que nous avons employé avait un grand diamètre et une résistance r négligeable. C'est la seule raison pour laquelle le premier cas était si simple et a pu conduire si aisément à une formule qu'il a suffi d'interpréter pour l'adapter à tous les cas.

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES. — Considérons en dernier lieu une pile formée de n éléments de Daniell et en général de n couples à action constante, nous allons calculer l'intensité du courant produit. Les divers éléments ont des forces électromotrices A_1, A_2, A_3, ..., et opposent des résistances r_1, r_2, r_3, ... Le premier engendre un courant qui parcourt le circuit tout entier, c'est-à-dire le conducteur extérieur dont la résistance est R, et tous les éléments de la pile qui offrent une somme de résistances $r_1 + r_2 + r_3 + \ldots$. L'intensité sera

$$i_1 = \frac{A_1}{R + r_1 + r_2 + r_3 + \ldots};$$

le courant donné par le deuxième élément traversera le même circuit, et l'on aura

$$i_2 = \frac{A_2}{R + r_1 + r_2 + r_3 + \ldots};$$

il en sera de même de chacun des autres. Tous ces courants dirigés dans le même sens se réuniront en un seul égal à leur somme

$$(4) \qquad I = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_n}{R + r_1 + r_2 + \ldots + r_n} = \frac{\Sigma A}{R + \Sigma r}.$$

Telle est la solution générale du problème que nous nous étions proposé tout d'abord; elle est complète puisqu'elle permet de calculer l'intensité du courant engendré par une pile quelconque, quand on connaît les constantes A et r qui déterminent chaque élément et la résistance R du circuit interpolaire. Pour couronner cette étude remarquable par une dernière sanction expérimentale, M. Pouillet a vérifié la formule (4).

Il a pris 6 éléments de Daniell sensiblement égaux entre eux, et il a déterminé séparément leur force électromotrice A et leur

résistance propre r. A cet effet il a, comme précédemment, adapté à chacun d'eux un conducteur extérieur constitué par des longueurs variables o, λ', λ'', λ''', d'un fil de cuivre normal et par une boussole des tangentes recouverte d'une longueur λ du même fil; elle servait à mesurer les intensités I, I', I''. On a pour le premier élément

$$I_1 = \frac{A_1}{r_1 + \lambda}, \quad I'_1 = \frac{A_1}{r_1 + (\lambda + \lambda')}, \quad I''_1 = \frac{A_1}{r_1 + (\lambda + \lambda'')} \cdots$$

Ce sont autant d'équations qui, combinées entre elles deux à deux, font connaître une série de valeurs de A_1 et de r_1, dont on prend les moyennes.

Ayant répété les mêmes opérations pour chacun des 6 couples et déterminé les valeurs de A_2, A_3, ..., et de r_2, r_3, ..., M. Pouillet assembla ces couples en série pour former une pile dont il réunit les pôles par les conducteurs extérieurs qui avaient précédemment servi à chaque élément, c'est-à-dire la même boussole et les mêmes fils différents o, λ', λ'', λ''', ...; alors la résistance totale R du conducteur interpolaire était, dans les divers cas, égale à $\lambda + \lambda'$, $\lambda + \lambda''$, ...

Toutes les quantités qui entrent dans la formule (4) ayant ainsi été mesurées individuellement, on put calculer la déviation δ de la boussole

$$\operatorname{tang} \delta = I = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_6}{R + r_1 + r_2 + \ldots + r_6};$$

d'autre part on mesura cette déviation, et le tableau suivant montre que les valeurs observées et calculées sont égales.

LONGUEUR DU CIRCUIT extérieur.	DÉVIATIONS OBSERVÉES.		DÉVIATIONS CALCULÉES.
	1 élément.	6 éléments.	6 éléments.
m	o	o	o
λ + 0	69,00	68,30	68,23
λ + 5	43,20	63,20	63,15
λ + 10	30,00	58,30	58,33
λ + 40	11,00	39,00	38,30
λ + 70	"	28,00	27,42
λ + 100	"	21,30	21,25

Si nous nous réduisons au cas où la déviation est très-petite, elle est proportionnelle à l'action magnétique exercée sur l'aiguille, c'est-à-dire à l'intensité I du courant multiplié par le nombre des tours m; et, en désignant par K une fonction des dimensions du cadre, c'est-à-dire de p,

$$\delta = \mathrm{K}\,\frac{mn\mathrm{A}}{\mathrm{R}+nr+\frac{mp}{cs}}.$$

S'il arrive que la résistance primitive du circuit $\mathrm{R}+nr$ soit très-grande, par exemple si le courant traverse des liquides, $\frac{mp}{cs}$ sera négligeable et la déviation sera proportionnelle au nombre des tours m : plus m sera grand, plus le galvanomètre sera sensible. Mais lorsque $\mathrm{R}+nr$ sera très-petit, comme cela arrive pour les piles thermo-électriques, on aura sensiblement

$$\delta = \mathrm{K}\,\frac{n\mathrm{A}cs}{p}.$$

Le nombre m des tours devient indifférent et la déviation est proportionnelle à la section s du fil : il sera donc avantageux d'augmenter cette section et inutile de multiplier les tours, et comme la valeur de K est d'autant plus grande que le courant est plus rapproché des aiguilles, il faudra diminuer le périmètre p du cadre.

THÉORIE DE OHM. — Ce qui nous reste maintenant à faire, est de montrer comment on peut déduire les lois que nous avons exposées d'une hypothèse sur le mode de propagation de l'électricité. Nous arrivons ainsi à indiquer les idées que Ohm a tout d'abord émises.

On sait qu'au siége de l'action électromotrice une différence de tension, qu'on peut représenter par $2e$, s'établit entre le métal et le liquide en contact, et qu'elle se reproduit instantanément aussitôt qu'on la détruit; d'où il résulte qu'aux deux extrémités du conducteur interpolaire la différence de tension est $2e$, même pendant le passage du courant. Supposons que ce conducteur soit homogène, qu'il ait une longueur l, et soit divisé par la pensée en tranches infiniment minces. Ohm admet

que la quantité d'électricité qui se transmet d'une tranche à la suivante pendant un temps égal à l'unité, est proportionnelle à la différence des tensions de ces tranches, absolument comme Fourier admet que dans un mur indéfini la quantité de chaleur transmise de couche en couche est proportionnelle à leur différence de température.

Puisque, dans ces deux ordres de phénomènes, les hypothèses sur la loi de la propagation de la chaleur et de l'électricité sont les mêmes, les conséquences doivent être absolument identiques. Or nous avons vu qu'au moment où le mur indéfini arrive à l'état d'équilibre mobile, les températures décroissent de la face antérieure à la face postérieure, suivant une progression arithmétique, quand les distances croissent aussi en progression arithmétique; par conséquent, dans le conducteur AB, la tension devra être $+e$ au point A, $-e$ au point B, et pourra se représenter en tous les autres points par les ordonnées de la droite CD (*fig.* 536).

Fig. 536.

En second lieu nous avons trouvé que si a et b expriment les températures des couches extrêmes et d l'épaisseur du mur, chaque unité de surface d'une tranche quelconque laisse écouler pendant un temps égal à l'unité une quantité de chaleur $M\dfrac{a-b}{d}$, M étant le coefficient de conductibilité calorifique: de même, la quantité d'électricité qui traverse pendant l'unité de temps l'unité de surface d'une tranche du conducteur devra être $c\dfrac{2e}{l}$; c étant le coefficient de conductibilité électrique, $2e$ la différence des tensions aux deux pôles, et l la longueur du circuit. Par suite, à travers une section s, cette quantité d'électricité sera $cs\dfrac{2e}{l}$: c'est l'intensité du courant, et l'on aura

$$I = 2e\frac{cs}{l},$$

formule identique à celle que l'expérience donne

Il résulte de là que deux conducteurs csl, $c's'l'$ sont équi-

valents et peuvent être remplacés l'un par l'autre, lorsqu'ils satisfont à la condition $\frac{cs}{l} = \frac{c's'}{l'}$. Par conséquent, on arrivera comme précédemment à exprimer l'effet produit par des circuits multiples ou dérivés, et enfin à la formule de la pile.

TENSIONS DANS UN CIRCUIT. — L'hypothèse de Ohm peut être soumise à une vérification beaucoup plus immédiate. Elle indique en effet que toute l'étendue du conducteur doit offrir des tensions électriques variant suivant une loi déterminée. Rien n'est donc plus facile que de constater l'existence de cette tension et de vérifier la loi de sa variation; c'est ce que vient de faire M. Kohlrausch.

M. Kohlrausch se servait d'un électromètre condensateur, mettait l'un des plateaux en communication avec le sol, et l'autre avec le point du conducteur qu'il voulait étudier. Cela fait, il enlevait ce dernier plateau et mesurait la tension qu'il avait acquise au moyen d'un électromètre fondé sur la torsion. Il commença par étudier les deux pôles de divers éléments. Il mesurait leur force électromotrice A par un des procédés que nous ferons connaître bientôt, et leur tension $+e$ ou $-e$: cette tension fut toujours trouvée proportionnelle à A.

En second lieu il réunit les deux pôles d'un couple à courant constant, par un long circuit métallique qui était replié en zigzag afin d'occuper moins de place, et il fit communiquer avec le sol un des points du circuit qui alors perdait toute tension et se trouvait à l'état naturel. Ensuite il mit successivement en contact avec le plateau collecteur deux points pris à des distances égales du point neutre, et il trouva qu'ils avaient des tensions égales mais contraires, l'une positive vers le pôle positif, l'autre négative dans le sens opposé, et toutes deux proportionnelles aux distances des parties touchées au point neutre.

Enfin il constitua des circuits hétérogènes, soit avec des fils de même nature, mais de diamètres inégaux, soit avec des fils différents et de sections égales, soit enfin avec des liquides. En mettant un point du circuit en contact avec le sol, par exemple le pôle négatif, il trouva qu'à partir de ce pôle les divers points du circuit avaient des tensions positives crois-

santes et proportionnelles aux longueurs réduites des parties du circuit comprises entre le pôle négatif et le point touché.

Distance au pôle zinc..	118,5	237	355,5	474	610,3	745,3	879	1014
Tensions observées....	0,85	1,85	2,69	3,70	5,03	5,99	6,93	7,96
Tensions calculées....	0,93	1,86	2,89	3,73	4,80	5,86	6,91	7,98

L'hypothèse de Ohm doit donc être considérée comme directement justifiée. Il ne nous reste plus qu'à concilier l'idée que nous nous sommes précédemment faite du courant électrique, avec cette différence de tension des divers points qui est maintenant démontrée. Nous avons été conduits, pour expliquer les décompositions chimiques, à considérer les molécules comme étant polarisées à leurs extrémités. Or il peut arriver que la molécule n° 1, qui est en présence du pôle positif, éprouve d'abord une décomposition polaire, qu'ensuite son fluide négatif se recombine avec le positif du pôle, et qu'elle reste chargée d'une quantité $(e - \alpha)$ de fluide positif. La seconde molécule éprouvera une action semblable, et un état final s'établira quand de chaque molécule à la suivante il y aura une différence de tension positive constante et égale à α.

C'est l'état dans lequel le courant se trouve, d'après les idées de Ohm et les expériences de M. Kohlrausch. A partir de ce moment l'écoulement continu d'électricité peut se concevoir comme il suit. Entre chaque molécule consécutive une action d'influence nouvelle tendra à amener une quantité $-\beta$ de fluide négatif aux parties antérieures, et $+\beta$ de fluide positif à la face opposée, puis par des recompositions successives toutes les charges négatives $-\beta$ marcheront d'un rang vers le pôle positif, et les positives $+\beta$ s'avanceront d'un rang vers le pôle opposé. En un mot, il faut ajouter à l'hypothèse de M. de la Rive cette seule condition qui avait été omise, que les molécules prennent d'abord pendant le premier moment un état de tension qui persiste ensuite, après quoi la transmission des deux fluides se fait de molécule à molécule par actions successives, et les actions chimiques s'expliquent absolument comme nous l'avons exposé précédemment.

ÉTAT VARIABLE DES TENSIONS. — Quand un mur indéfini s'échauffe par l'une de ses faces, il y a deux périodes distinctes à considérer. Dans la première, la chaleur traversant la surface

de chauffe antérieure est employée à élever la température des couches successives, d'abord exclusivement; bientôt elle atteint la surface postérieure qui commence à rayonner, et qui rayonne de plus en plus à mesure qu'elle s'échauffe davantage, jusqu'à atteindre un état stationnaire. Pendant tout ce temps, il entre plus de chaleur qu'il n'en sort; les températures s'élèvent en tous les points, et la masse prend une charge calorifique donnée.

La deuxième période commence au moment où la chaleur qui sort devient égale à celle qui entre, et où l'état de température est devenu invariable.

Or, puisque la propagation de l'électricité a été assimilée par Ohm à celle de la chaleur, et que l'état permanent dans lequel se trouvent les conducteurs électriques traversés par les courants, est identique à l'état final d'un mur traversé par la chaleur, il doit être aussi précédé d'une première période pendant laquelle le fil aurait des tensions variables, laisserait sortir un courant moins intense que celui qui entre, et prendrait une charge, sorte de température électrique qui serait fonction des données du courant et du conducteur. La durée de cette période serait elle-même variable avec les circonstances. Ohm a en effet signalé cette première phase de l'établissement d'un courant, et MM. Gaugain et Guillemin l'ont constatée.

Pour le faire, il fallait la prolonger; M. Gaugain prit des conducteurs imparfaits, des fils de coton ou des colonnes d'huile grasse dans des tubes de gomme laque. Il les mettait en communication avec une source d'électricité statique par une de leurs extrémités. La propagation était si lente, qu'on pouvait aisément la suivre de proche en proche; quand elle était complétée, on isolait la masse qui était alors chargée d'une quantité d'électricité déterminée E. M. Gaugain trouva que E est variable avec la surface extérieure et aussi avec la section du conducteur, et qu'elle est la moitié de la charge statique que prendrait ce conducteur s'il était isolé. Cela prouve que les tensions décroissent suivant la même loi que les températures dans un mur.

Il a ensuite mesuré la durée T de cette première période, et ses expériences démontrent qu'elle est proportionnelle à E, au carré l^2 de la longueur du conducteur, en raison inverse de

sa section s et de sa conductibilité c :

$$T = m \frac{E l^2}{cs}.$$

Cette loi devant s'appliquer aux conducteurs métalliques, MM. Guillemin et Burnouf ont opéré sur des fils télégraphiques de 500 kilomètres de longueur environ. Leur appareil, assez compliqué, avait pour pièce essentielle un cylindre de bois, sur lequel était appliquée parallèlement aux génératrices une lame métallique étroite, plus large à un bout qu'à l'autre et toujours en communication avec le pôle positif d'une pile. Un ressort appuyé sur le cylindre était en rapport avec l'extrémité n° 1 du fil de ligne, pendant que l'autre extrémité n° 2 était toujours en communication avec la terre. En faisant tourner le cylindre avec une vitesse très-grande et connue, un courant s'établissait à chaque révolution pendant que le ressort touchait la lame, il parcourait la ligne et rentrait dans la terre. Mais, avant d'y arriver, il pouvait prendre une autre route par un fil de dérivation qui l'amenait par un deuxième ressort sur une autre lame très-mince située sur le même cylindre et en communication avec le pôle négatif. Cette nouvelle route n'était ouverte que pendant un temps très-court qui succédait à l'instant où le courant était lancé, après un intervalle θ déterminé par la vitesse de rotation. De cette façon, le courant entrait dans l'extrémité n° 1, il revenait par le bout n° 2, et par le fil de dérivation, après un temps θ. Des galvanomètres placés à l'extrémité n° 1 et dans le fil de dérivation, mesuraient l'intensité du courant d'entrée et du courant de sortie : ces courants étaient discontinus, mais comme ils se reproduisaient à chaque révolution, les déviations étaient permanentes. Quand le temps θ était de 0'',019, le courant d'entrée était très-fort, celui de sortie produisait une déviation égale à 0°,50. Mais si l'intervalle θ devenait égal à 0'',240, le courant d'entrée diminuait, parce que les tensions qui avaient eu le temps de s'établir dans le fil lui faisaient obstacle, et celui de sortie avait pris une valeur maximum 19°,50, parce qu'alors l'état d'équilibre final était atteint. Cependant le deuxième courant était toujours inférieur au premier, ce qui tient aux déperditions de fluide par les défectuosités de l'isolement de la ligne.

MM. Guillemin et Burnouf ont reconnu que la durée de la période d'établissement du circuit croît plus vite que la longueur l, mais moins vite que son carré l^2; il est probable qu'il y a sur ce point de nouvelles expériences à tenter avec des circuits mieux isolés.

Cet état variable des tensions se prolonge bien davantage quand les fils sont plongés dans l'eau ou enfouis dans le sol, ou entourés d'enveloppes métalliques comme pour les câbles sous-marins. M. Siemens avait déjà constaté qu'alors ils se chargent comme des condensateurs électriques, parce que l'électricité de tension du fil appelle et condense du fluide contraire sur l'armature extérieure. Ce point fut étudié par MM. Faraday et Wheatstone. Faraday opéra sur 200 paquets réunis de fils recouverts de gutta-percha, ayant chacun 800 mètres de longueur; ils étaient suspendus dans l'eau d'un canal. M. Wheatstone fit ses expériences sur un câble sous-marin enveloppé de fils de fer qui contenait six fils de cuivre qu'on pouvait réunir en un seul, et dont la longueur totale était de 1062 kilomètres; voici les résultats communs de ces expériences :

1°. Le fil étant isolé par un bout et mis en communication par l'autre avec le pôle positif d'une pile dont le négatif touchait au sol, on vit un courant s'élancer dans le fil pendant 1 ou 2 secondes, puis cesser; cela prouve que le fil prend lentement de l'électricité et arrive à un état de tension finale.

2°. On enlève la pile et on touche à la main le bout du fil avec lequel elle a été mise en communication. On éprouve une commotion qui se reproduit plusieurs fois si les contacts sont courts et successifs. Cela prouve que le fil se décharge.

3°. On place aux deux extrémités et au milieu du fil trois galvanomètres. Quand on charge l'un des bouts avec une pile, le courant se montre successivement dans le premier, le deuxième et le troisième galvanomètre, après des intervalles de temps qui dépassent quelquefois 2 secondes.

4°. M. Clarke étudia deux fils très-longs et égaux, l'un aérien, l'autre immergé dans l'eau. Il lançait le courant dans tous les deux à la fois par l'une des extrémités, et le recevait à l'autre par deux pointes de fer appuyées sur un cylindre tournant, couvert de papier humide imprégné de cyanoferrure de potassium. Le fer produisait une tache de bleu de Prusse

sur le papier. Or on reconnut 1° que la tache bleue est toujours en retard pour le fil enfoui, ce qui prouve que la propagation est moins rapide; 2° que le trait est faible en commençant, qu'il augmente ensuite et qu'il s'affaiblit peu à peu pour le fil enfoui, tandis qu'il est nettement terminé et d'épaisseur constante avec le fil aérien. Cela montre que, dans le premier cas, le courant de sortie est d'abord faible, qu'il grandit ensuite et qu'il cesse lentement. Il y a donc une période d'établissement, un état stationnaire et une période de décharge.

Après avoir reconnu ces divers phénomènes, on peut se demander quel sens il faut attacher à ce que l'on a nommé la *vitesse* de l'électricité. Évidemment l'électricité ne se propage ni comme un projectile, ni comme le son, la lumière, et la chaleur rayonnante. Sa transmission est un fait extrêmement complexe, puisque le courant d'entrée est d'abord utilisé pour produire une charge électrique, et que le courant de sortie commence par apparaître, va en augmentant et enfin atteint sa valeur finale. Si l'on prend pour le temps T de la propagation celui de la période des tensions variables, on aurait

$$l = VT = Vm\frac{El^2}{cs} \quad \text{ou} \quad V = \frac{cs}{mEl},$$

ce qui veut dire que la vitesse serait, non point constante, mais en raison inverse de la longueur du fil. On pourrait également définir la vitesse par le temps qui s'écoule entre l'entrée de l'électricité et l'apparition première du courant de sortie : on trouverait d'autres résultats. Les divers expérimentateurs qui ont étudié cette question n'ont fait ni l'un ni l'autre : ils ont mesuré la durée de la transmission, en cherchant le moment où le courant d'arrivée a atteint une intensité suffisante pour être manifesté par leurs procédés d'études, et comme ces procédés étaient inégalement sensibles et que d'autre part les fils étaient ou dans l'air ou dans l'eau, leurs résultats ont été très-divers. C'est une question qu'il faudra reprendre avec des conditions mieux définies.

SOIXANTE-SEPTIÈME LEÇON.

DE LA MESURE DES CONDUCTIBILITÉS.

Unité de conductibilité. — Procédé de M. Pouillet. — Rhéostat. — Procédé de M. Becquerel. — Tableau des conductibilités des métaux. — Cas des liquides. — Influence de la température. — Influence du dissolvant. — Relation entre les conductibilités calorifiques et électriques.

On vient de voir que l'intensité du courant engendré par une pile quelconque est exprimée par la formule

$$i = \frac{A + A' + A'' + \ldots}{+\frac{l}{cs} + \frac{l'}{c's'} + \ldots + \frac{L}{cs}}.$$

Pour la calculer il faudra 1° avoir évalué les longueurs et les sections de toutes les parties du circuit, ce qu'il sera possible de faire dans chaque cas particulier; 2° avoir mesuré les conductibilités spécifiques c, c', c'' de toutes les substances, et les forces électromotrices A, A′, A″,..., de chaque espèce de couples, c'est ce qu'on peut faire une fois pour toutes. Nous allons aujourd'hui déterminer les coefficients de conductibilité; mais avant tout il faut fixer l'unité à laquelle nous les rapporterons.

Nous sommes libres de choisir comme nous le voudrons le métal dont la conductibilité sera prise comme unité : ce sera le mercure, le cuivre, l'argent, ou tout autre; mais il faut le choisir afin que toutes les résistances soient mesurées avec un même étalon, et il est utile que cet étalon puisse être retrouvé aisément par tous les observateurs. M. Pouillet a adopté le mercure à zéro, parce qu'on peut toujours, en le purifiant, le ramener au même état; mais comme il faut le renfermer dans des tubes de verre qui ne sont jamais exactement calibrés, il est impossible de l'obtenir en cylindres réguliers. M. Jacobi a proposé le cuivre, et M. Ed. Becquerel l'argent. Ces métaux

offrent des avantages et des inconvénients inverses : l'avantage de se tirer régulièrement à la filière, et l'inconvénient d'être plus ou moins écrouis, toujours impurs et de n'avoir point une conductibilité constante. Le choix de M. Pouillet nous paraît le meilleur, car on peut toujours graduer la capacité d'un tube de verre, comme on le fait pour un thermomètre. On y introduira une colonne de mercure de quelques millimètres, et d'un poids p; on la fera glisser d'un bout à l'autre; elle prendra des longueurs $l, l', l'', \ldots$, et aura des sections $\frac{p}{lD}, \frac{p}{l'D}, \frac{p}{l''D}, \ldots$, que l'on calculera; puis si on remplit le tube entier d'une colonne continue de mercure, elle se composera d'une suite de longueurs égales à l, l', l'', dont les sections seront connues, et dont les résistances seront

$$\frac{l^2 D}{p}, \quad \frac{l'^2 D}{p}, \quad \frac{l''^2 D}{p},$$

elle équivaudra à une colonne unique L de 1 millimètre de section, et dont la longueur L serait

$$L = \frac{D}{p}(l^2 + l'^2 + l''^2 \ldots).$$

On pourra ensuite comparer la résistance de ce conducteur à celle d'un fil formé par un métal quelconque, et chercher le rapport de conductibilité des deux métaux par les méthodes que nous allons maintenant exposer.

Pour trouver, en général, le rapport des coefficients de conductibilité c et c' de deux substances, on prend un fil de chacune d'elles, on mesure les sections s et s', on donne à l'un d'eux une longueur fixe l et l'on fait varier celle du second l' jusqu'à ce qu'il soit devenu équivalent au premier. Alors on a

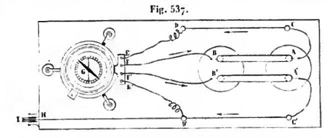
$$\frac{l}{cs} = \frac{l'}{c's'}, \quad \text{d'où} \quad \frac{c}{c'} = \frac{l}{l'}\frac{s}{s'};$$

Tout se réduit donc à trouver un procédé pour reconnaître que deux fils s'équivalent.

PROCÉDÉ DE M. POUILLET. — M. Pouillet employait deux couples thermo-électriques identiques AB, A'B' (*fig.* 537); il les plaçait l'un auprès de l'autre, faisait plonger les extrémités A, A'

dans un vase plein d'eau bouillante, et entourait de glace les

Fig. 537.



autres soudures B, B'. Les deux courants passaient dans le galvanomètre différentiel G, en suivant les circuits ACDEFB, A'C'D'E'F'B' qui se composaient de conducteurs égaux et fixes, à l'exception des deux parties variables CD et C'D'; CD était le fil dont on voulait trouver la conductibilité *c*; C'D' était un autre fil en platine fixé en C', enroulé sur la poulie I et tendu horizontalement sur une table par le moyen de poids. Un bouchon D', dans lequel était creusée une cavité pleine de mercure en communication avec D'E', pouvait glisser sous le fil de manière à faire varier C'D' à volonté.

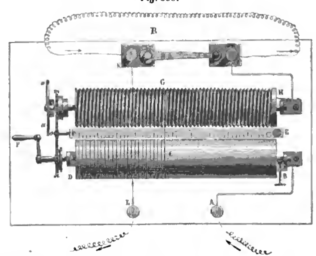
On transportait en C l'extrémité D du fil DE, et on rapprochait D' de C' jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre fût nulle. A ce moment les deux circuits étaient égaux; ensuite on interposait le fil CD dans le premier courant, on éloignait D' jusqu'à annuler de nouveau la déviation, et la course du bouchon mesurait la longueur du fil de platine équivalente à CD. On calculait ensuite le rapport des conductibilités par la formule précédente.

RHÉOSTAT. — La nécessité d'augmenter ou de diminuer la longueur du fil C'D', auquel on compare tous les autres, a inspiré à M. Wheatstone un de ses plus ingénieux appareils qu'il a nommé *rhéostat* (*fig.* 538).

Sur une table en bois sont placés horizontalement et parallèlement un cylindre de cuivre C et une vis en bois ou en verre G, dont le pas est de 1 millimètre. Tous deux ont un diamètre égal, et peuvent tourner autour de leur axe dans le même sens et de la même quantité. Le mouvement est donné par une manivelle P et se transmet à la vis D et au cylindre C par

deux roues d'engrenage égales, *m* et *n*, reliées par un pignon O.

Fig. 538.



Un fil métallique bien homogène et très-fin est enroulé de D en C sur le métal, de G en H dans les sillons de la vis, et le nombre des tours augmente ou diminue sur celle-ci, suivant qu'on fait marcher la manivelle dans un sens ou dans l'autre. Comme à chaque circonférence que l'on fait, le fil de jonction GC avance de 1 millimètre, le nombre de tours total se mesure par une règle divisée EF et les fractions des tours sont appréciées par le mouvement d'une aiguille qui parcourt un cercle fixe *aa*.

Supposons maintenant que le courant vienne de A en B, il traversera le cylindre de B en C sans éprouver de résistance sensible; puis il passera de C en G et parcourra toutes les spires du fil qui sont logées dans la rainure de la vis isolante; après quoi il reviendra par HI jusqu'à la poupée I et jusqu'au pôle négatif. On pourra donc augmenter ou diminuer la longueur du circuit en augmentant ou en diminuant le nombre des spires sur la vis. Si ce nombre est n et si le rayon de la vis est r, $2\pi rn$ sera la longueur du fil et $\frac{2\pi rn}{cs}$ sa résistance.

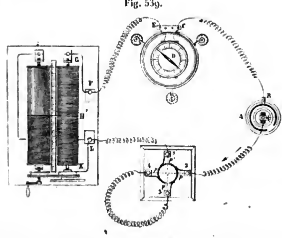
Pour employer cet appareil à la mesure des conductibilités,

on a placé sur la même table une seconde poupée K vis-à-vis de la première I; toutes deux peuvent être réunies ou séparées par un bras métallique M assez gros pour n'avoir pas de résistance sensible. Supposons qu'elles soient d'abord réunies : le courant passera par le rhéostat, reviendra par IMKL jusqu'au bouton L et jusqu'à la pile par l'intermédiaire d'un galvanomètre dont on notera la déviation. Si l'on sépare ensuite les poupées I et K en écartant le bras M, la communication sera interrompue; mais on la rétablit par le fil IRK dont on veut trouver la conductibilité; il est traversé par le courant qu'il affaiblit, parce qu'il oppose une résistance déterminée, et l'on fait tourner le rhéostat de manière à diminuer de n le nombre de tours enroulés sur GH, jusqu'à ce que la déviation soit redevenue la même qu'avant l'introduction du fil d'épreuve. D'une part, on a introduit la résistance $\frac{l'}{c's'}$ du fil à essayer; de l'autre, on a supprimé celle du fil déroulé qui est $\frac{2\pi rn}{cs}$, et puisque le courant est resté le même, il faut que

$$\frac{2\pi rn}{cs} = \frac{c's'}{l'}.$$

La *fig.* 539 représente une autre disposition qui produit le

Fig. 539.



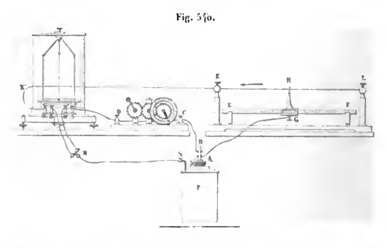
même effet. Le courant d'une pile A arrive d'abord à un com-

mutateur dont la ligne d'interruption est en $p'p'$; il passe de 3 à 4 dans le fil d'épreuve, de 1 à LH'G dans le rhéostat, de F à E et à C dans un galvanomètre EDC, et il revient en B : on note la déviation δ. Ensuite on tourne la ligne d'interruption en pp ; le courant marche de 2 à 1 sans passer par le fil d'épreuve ; la déviation augmente ; mais on la ramène à δ en augmentant de n tours la longueur du fil enroulé sur la vis.

PROCÉDÉ DE M. BECQUEREL. — On doit à M. Ed. Becquerel des expériences fort soignées, exécutées au moyen d'une méthode un peu différente, mais meilleure, qu'avait imaginée son père, et qu'il a perfectionnée (*fig.* 540).

Le courant partant de A se divise en deux autres : l'un BC

Fig. 540.



traverse le rhéostat CD, le fil bb' d'un galvanomètre différentiel et le conducteur bMN qui le ramène à la pile ; l'autre courant AG arrive en G à une règle de cuivre divisée EF, au-dessus de laquelle est tendu le fil d'épreuve LK ; il pénètre dans ce fil par une poupée GH qui glisse sur EF ; il traverse la portion HK, se rend par KK' dans le fil aa' du même galvanomètre, et enfin il rejoint le pôle négatif par aMN. On voit qu'en enroulant ou en déroulant le rhéostat, on augmentera ou on diminuera à volonté la résistance du premier courant, et qu'en faisant glisser la poupée de K en H, on interposera dans le second circuit

des longueurs HK du fil d'épreuve qui se mesureront sur la règle EF par le vernier G.

On commence par mettre cette poupée tout près de K, dans une position initiale quelconque, et par faire jouer le rhéostat jusqu'à ramener le galvanomètre au zéro ; ensuite on augmente HK d'une quantité l et le fil isolé du rhéostat de $2\pi rn$, jusqu'à rétablir l'égalité des deux courants : l et $2\pi rn$ ont la même résistance.

Voici maintenant deux tableaux qui contiennent les principaux résultats obtenus :

Conductibilité des solides.

D'APRÈS M. ED. BECQUEREL.

	Par rapport à l'argent.	Par rapport au mercure.
Argent pur recuit........	100,000	55,504
Argent pur écroui.......	93,448	51,869
Cuivre pur recuit........	91,439	50,763
Cuivre pur écroui.......	89,084	49,445
Or pur recuit............	65,458	36,332
Or pur écroui...........	64,285	35,740
Cadmium écroui.........	24,574	13,640
Zinc écroui..........	24,164	13,412
Étain écroui............	13,656	7,579
Palladium écroui........	13,977	7,758
Fer écroui.............	12,124	6,729
Plomb écroui...........	8,245	4,565
Platine écroui...........	8,042	4,463
Mercure (14°)...........	1,8017	1,000

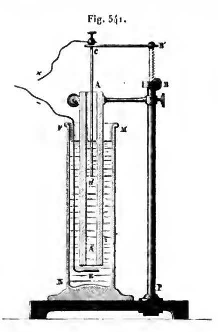
D'APRÈS M. MATHIESSEN.

Sodium.................	37,43	»
Magnésium.............	25,47	»
Calcium...............	22,14	»
Potassium.............	20,85	»
Lithium................	19,00	»
Strontium..............	6,71	»

CAS DES LIQUIDES. — Pour comparer la conductibilité des li-

quides à celle du métal étalon, on emploie généralement un instrument spécial nommé *rhéostat à liquide* (*fig.* 541); il se

Fig. 541.



compose essentiellement d'un tube en cristal AA' dont le canal rodé intérieurement a été rendu cylindrique. On mesure une fois pour toutes son rayon r, et on calcule sa section $s = \pi r^2$.

Il est plongé dans une éprouvette en verre MN au milieu du liquide sur lequel on veut opérer; il est soutenu par sa partie supérieure au moyen d'une traverse qui glisse et peut se fixer sur un pied BP.

Dans l'intérieur de ce pied s'enfonce une crémaillère divisée BB', qui s'élève ou s'abaisse par le jeu d'un pignon B et dont la course est mesurée par un vernier; elle soutient une tige verticale en platine cd enfermée et mastiquée dans un tube de verre, et qui pénètre dans le canal AA'. On fait arriver le courant par cette tige; il traverse le liquide de d en E, et il revient par une plaque métallique E et par le conducteur EF.

Quand les choses restent dans le même état, le courant éprouve dans le liquide une résistance déterminée; mais si on

soulève ou qu'on abaisse la crémaillère d'une hauteur l, on augmente ou on diminue le circuit d'une colonne liquide de longueur l, de section s et de conductibilité c. On voit que cet appareil a les mêmes propriétés et peut servir aux mêmes usages qu'un rhéostat ordinaire, et en le substituant à celui-ci dans les appareils de M. Wheatstone ou de M. Ed. Becquerel, on pourra toujours rendre la colonne liquide équivalente à un fil métallique de résistance connue $\frac{l'}{c's'}$: alors on calculera c par la formule

$$\frac{l}{cs} = \frac{l'}{c's'}.$$

Mais dans ces expériences on rencontre des difficultés spéciales : 1° la décomposition de l'électrolyte qu'on essaye altère progressivement sa composition, et par suite sa conductibilité ; 2° les gaz qui se dégagent en général opposent un obstacle mécanique et diminuent l'intensité ; 3° enfin les électrodes se polarisent, ce qui produit l'effet connu de la résistance au passage. Pour éviter cette dernière cause d'erreur, M. Becquerel a modifié comme il suit sa méthode générale.

Il remplace dans les deux courants dérivés, le rhéostat CD d'une part, et le fil KH de l'autre (*fig.* 537), par deux rhéostats à liquides identiques, et il les règle de manière à ramener au zéro l'aiguille du galvanomètre ; alors les changements de composition qui se produisent dans l'un se font sentir également dans l'autre, et les résistances provenant de la polarisation des électrodes ou du dégagement des gaz sont égales des deux côtés et se détruisent.

Cela fait, on interpose dans un des circuits une résistance métallique connue $\frac{l'}{c's'}$, et on augmente de l la longueur de la colonne liquide dans l'autre, ce qui introduit une résistance $\frac{l}{cs}$, qui est égale à $\frac{l'}{c's'}$ quand le galvanomètre est revenu au zéro. La polarisation des électrodes s'annule dans cette seconde phase de l'expérience comme dans la première. Quant aux changements de composition et aux bulles de gaz qui se produisent dans le liquide, elles altèrent sa conductibilité c, mais

comme leur effet est proportionnel à l'intensité du courant, on peut diminuer celle-ci, jusqu'à ce qu'il soit insensible, ou bien choisir les électrodes de manière que ces phénomènes n'aient pas lieu. Voici quelques résultats numériques :

Conductibilité des liquides.

	Températ.	c
	°	
Argent	0,00	100,000 000 00
Acide azotique à 36°	13,10	0,000 093 77
Chlorure de sodium saturé à 9°,50	13,40	0,000 031 52
250 eau. — 30 iodure de potassium.	12,50	0,000 011 20
Azotate de cuivre saturé	13,00	0,000 008 99
Sulfate de zinc saturé	14,40	0,000 005 77
Sulfate de cuivre saturé	9,25	0,000 005 42
Eau distillée	»	0,000 000 013

Ce qui est le plus digne d'attention dans ces résultats, est la grande différence qui existe entre les conductibilités des divers corps; l'acide azotique conduit un million de fois, et l'eau distillée dix billions de fois moins que l'argent, et si on compare ensuite l'eau distillée à la plupart des substances minérales qui ne sont point traversées par les courants, et surtout aux corps qui isolent l'électricité statique, on sera convaincu que de toutes les propriétés physiques de la matière, la conductibilité est celle qui est le plus inégalement distribuée et qui peut le mieux caractériser les diverses substances; aussi les moindres impuretés, ainsi que les moindres variations de température, la font-elles changer très-considérablement.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — La conductibilité des métaux diminue quand leur température augmente. La loi de cette diminution s'exprime par une formule analogue à celle de la dilatation. On a sensiblement

$$c_t = c_0(1 - Kt),$$

ou bien, en désignant par r_0 et r_t les résistances à zéro et à t, d'un fil de section et de longueur constantes,

$$r_t = r_0(1 + Kt).$$

Il était nécessaire de connaître pour chaque métal la valeur du coefficient K, afin de pouvoir calculer la conductibilité à une

température quelconque, après l'avoir déterminée à zéro. Ce coefficient a été mesuré par M. Ed. Becquerel, et peut se déduire des expériences de M. Lenz, qu'on trouvera ci-après :

Pouvoirs conducteurs à diverses températures.

D'après M. Ed. Becquerel.

	A ZÉRO.	A 100 DEGRÉS.	COEFFICIENT K.
Argent pur recuit	100,000	71,313	0,004022
Cuivre pur recuit	91,517	64,919	0,004097
Or pur	64,960	48,489	0,003397
Cadmium	24,579	17,506	0,004040
Zinc	24,063	8,657	0,003675
Fer recuit	12,350	8,387	0,004726
Plomb	8,277	5,761	0,004349
Platine recuit	7,933	6,688	0,001861
Mercure	1,738,7	1,5749	0,001040

D'après M. Lenz.

	CONDUCTIBILITÉS		
	A ZÉRO.	A 100 DEGRÉS.	A 200 DEGRÉS.
Argent	136,25	94,45	68,72
Cuivre	100,00	73,00	54,82
Or	79,79	65,20	54,49
Étain	30,84	20,44	14,78
Laiton	29,33	24,78	21,45
Fer	17,74	10,87	7,00
Plomb	14,62	9,61	6,16
Platine	14,16	10,93	9,00

Quand on continue d'élever la température t des métaux jusqu'à les fondre, leur conductibilité continue à décroître suivant les ordonnées d'une ligne d'abord droite, mais qui s'infléchit rapidement en tournant sa concavité vers l'axe des t quand elle approche du point de fusion : c'est ce que M. Matteucci a vu se produire progressivement pour le potassium

entre 47 et 57 degrés et brusquement pour le sodium à 93 degrés. Il y a là une variation de la conductibilité tout à fait analogue à la variation de volume. Cette diminution rapide de la conductibilité se constate pour tous les métaux qui se dilatent en se liquéfiant; mais ceux qui se contractent éprouvent un effet inverse, c'est-à-dire que la conductibilité croît par l'élévation de la température et par la fusion : c'est ce qu'a remarqué M. Matteucci pour l'alliage de Rose et pour le bismuth.

C'est ce qui se vérifie également pour les corps qui ne sont point métalliques, pour l'eau gelée, pour les chlorures, bromures et iodures, et pour un grand nombre de sels qui sont complétement isolants à l'état solide et qui deviennent conducteurs en se liquéfiant, non point brusquement au moment même où ils changent d'état, mais progressivement, à mesure qu'ils s'approchent de leur point de fusion; ainsi le verre commence à être conducteur entre 200 et 400 degrés. Suivant M. Hittorf, le sous-sulfure de cuivre et le sulfure d'argent sont dans le même cas.

Une fois qu'elles ont été rendues conductrices par leur fusion, ces substances le deviennent de plus en plus quand on les échauffe davantage; cela se voit pour l'eau, pour les solutions salines, et en général pour tous les liquides non métalliques. D'après M. Ed. Becquerel, ces variations se font, au signe près, suivant la même formule que pour les métaux :

$$c_t = c_0(1 + \mathrm{K}t),$$

et les valeurs de K sont très-considérables.

Valeurs de K.

Sulfate de cuivre saturé......	0,0286
Sulfate de zinc étendu.......	0,0223
Acide azotique ordinaire.....	0,0263

Il suit de là qu'à 100 degrés les conductibilités de ces liquides seraient plus que triplées. M. Hankel a prouvé depuis qu'elles suivent une loi moins simple et que la formule précédente doit être remplacée, comme pour les dilatations, par la suivante dans laquelle K, K',..., varient et augmentent avec le degré de concentration de la solution

$$c_t = c_0(1 + \mathrm{K}t + \mathrm{K}'t^2 \ldots).$$

INFLUENCE DU DISSOLVANT. — On doit à M. Matteucci la connaissance de quelques faits curieux relatifs aux propriétés comparées des sels fondus et dissous. Quelques-uns sont très-conducteurs quand ils ont éprouvé la fusion ignée; par exemple, les azotates de potasse et d'argent, les chlorures de potassium et de sodium et l'acétate de plomb; mais leur dissolution, même très-concentrée, est beaucoup moins conductrice. Si on mêle à cette solution d'autres sels qui puissent s'ajouter au premier, on augmente la conductibilité jusqu'à la rendre comparable à celle des métaux. Lorsqu'on électrolyse ces mélanges, ce sont ces sels qui sont exclusivement décomposés.

Au contraire d'autres corps liquéfiés sont moins conducteurs que l'eau; alors leur solution aqueuse est plus conductrice qu'eux-mêmes. Quand on vient à la décomposer, c'est l'eau qui s'électrolyse et ils éprouvent des actions secondaires : c'est le cas des acides azotique et sulfurique, du bichlorure d'antimoine et du perchlorure d'étain.

Il reste à savoir comment varie la conductibilité d'une solution quand on change la proportion de ses éléments. Il y a deux cas à distinguer : 1° les sels peu solubles prennent une conductibilité croissante à mesure que leur proportion devient plus grande, 2° les sels déliquescents et quelques acides en solutions de plus en plus concentrées offrent des conductibilités qui croissent d'abord jusqu'à un maximum pour diminuer ensuite.

Le sulfate de cuivre est dans le premier cas, et il résulte des expériences de M. Pouillet et de M. Becquerel que sa conductibilité a les valeurs suivantes à la température de 9°,60.

	Sulfate contenu q.	Conductibilités observées.	Conductibilités calculées.
250 gr. d'eau et 50 gr. de sulfate.	1	4,15	4,15
» 25 »	$\frac{1}{2}$	2,63	2,69
» 12,5 »	$\frac{1}{4}$	1,61	1,59

M. Ed. Becquerel admet que la conductibilité de cette dissolution varie suivant la formule

$$\frac{1}{c} = A + \frac{B}{q};$$

A et B ont les valeurs 0,1115 et 0,1295 et les résultats de la formule sont exprimés en regard de ceux de l'expérience. A et B changent avec la température de la solution.

On trouve dans la seconde catégorie le bichlorure et le nitrate de cuivre, le chlorure de sodium, le sulfate de zinc et, d'après Matteucci, les acides sulfurique, chlorhydrique et azotique. Mais si à partir de la solution qui est la plus conductrice on ajoute des quantités progressivement croissantes d'eau, la conductibilité diminue suivant la formule que nous venons de rapporter.

On voit que les coefficients de la conductibilité sont soumis à des causes de variation très-multipliées et que leurs lois sont loin d'être connues. Il y a cependant une remarque importante que l'on doit à MM. Wiedemann et Franz. Ces physiciens ont fait voir que les conductibilités calorifiques sont sensiblement égales aux conductibilités électriques, comme cela résulte du tableau suivant par lequel nous terminons ce sujet.

	CONDUCTIBILITÉS			
	ÉLECTRIQUE D'APRÈS			CALORIFIQUE
	RIESS.	BECQUEREL.	LENZ.	
Argent	100,0	100,0	100,0	100,0
Cuivre	66,7	91,5	73,3	73,6
Or	59,0	64,9	58,5	53,2
Laiton	18,4	"	21,5	23,6
Étain	10,0	14,0	22,6	14,5
Fer	12,0	12,35	13,0	11,9
Plomb	7,0	8,27	10,7	8,5
Platine	10,5	7,93	10,3	6,4
Argentan	5,9	"	"	6,3
Bismuth	"	"	"	1,8

SOIXANTE-HUITIÈME LEÇON.

DE LA MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES.

Unité des forces électromotrices. — Méthode de Fechner. — Méthode de Wheatstone. — Méthode de compensation. — Méthode d'opposition. — Force électromotrice relative des couples usuels. — Forces électromotrices vraies. — Siége des forces électromotrices. — Somme des forces électromotrices simples. — Force de polarisation. — Force des piles à gaz. — Force au contact des liquides. — Force au contact des métaux et des liquides. — Force totale dans les couples. — Lois des forces électromotrices.

UNITÉ DES FORCES ÉLECTROMOTRICES. — La formule de Ohm $i = \frac{A}{R}$ montre que la force électromotrice A est l'intensité du courant engendré par un électromoteur quand la résistance R du circuit est égale à l'unité. Il est évident que le nombre qui exprime A dépend à la fois des unités choisies pour mesurer i et R et que, pour un couple donné, il est déterminé quand elles le sont. Il n'y a donc point à se préoccuper de choisir l'unité des forces électromotrices; elle est nécessairement la force du couple qui donnerait l'unité d'intensité à travers l'unité de résistance.

Or nous avons déjà choisi les unités de résistance et d'intensité, et par conséquent la force électromotrice d'un couple est exprimée par le poids d'hydrogène qu'il dégagerait en 1 minute dans un voltamètre, si le circuit avait une résistance égale à celle d'un cylindre de mercure de 1 millimètre de section et de 1 mètre de longueur. C'est ce que nous nommerons la force électromotrice *vraie*.

Comme, d'après la loi de Faraday, les nombres d'équivalents d'hydrogène dégagé dans le circuit et de zinc dissous dans le couple sont égaux, on peut dire que la force électromotrice se mesure par le poids p du zinc qui se dissout en 1 minute, divisé par l'équivalent 33 du zinc, quand R est égal à l'unité.

Inversement, quand on connaîtra A et R on pourra calculer l'intensité i, c'est-à-dire le poids d'hydrogène que le courant dégage en 1 minute, et par suite le poids $i.33$ de zinc qui se dissout pendant le même temps.

Malheureusement ce n'est point ainsi qu'on a généralement évalué les forces électromotrices. Presque tous les observateurs ont adopté des étalons de résistance différents et mesuré les intensités par des boussoles de tangentes ou de sinus dont les sensibilités n'étaient ni égales ni définies; il en résulte que les valeurs qu'ils ont trouvées pour A sont exprimées par des nombres différents, en fonction d'unités arbitraires et indéterminées. Ces valeurs n'apprennent rien sur les forces vraies des couples, mais elles expriment leurs rapports.

On ne fait rien de plus quand on rapporte toutes les forces électromotrices à l'une d'elles choisie comme unité; par exemple, à celle d'un couple thermo-électrique déterminé, ou à celle d'un élément de Daniell, ou à celle que développe le zinc dans l'eau acidulée. Quel que soit le terme de comparaison qu'on adopte, la formule $i = \frac{A}{R}$ cesse d'être vraie, à moins qu'on ne prenne pour unité d'intensité celle du couple unité quand $R = 1$.

Nous ne trouverons donc dans les recherches qui vont suivre que des rapports entre les forces électromotrices; mais il suffira de les multiplier par la force électromotrice vraie du couple choisi arbitrairement comme unité pour avoir les valeurs de A qui conviennent à la formule de Ohm. Nous allons commencer par décrire les méthodes de mesure.

MÉTHODE DE FECHNER. — Il est clair que si on augmente progressivement la résistance propre r d'un couple de quantités connues R, R′, R″, et qu'on mesure les intensités correspondantes, on a

$$i = \frac{A}{r + R}, \quad i' = \frac{A}{r + R'}, \quad i'' = \frac{A}{r + R''}, \ldots$$

En groupant ces équations deux à deux, on peut calculer les valeurs de A et de r qui y satisfont et prendre la moyenne des résultats. Cette méthode, qui est générale, a été indiquée par

Ohm lui-même et adoptée par beaucoup d'observateurs. Mais elle ne peut s'appliquer qu'à des couples à action constante, car si A et r ou seulement l'une de ces deux quantités varie dans le cours des expériences, on n'obtient plus que des résultats erronés.

Fechner a imaginé de faire passer le courant du couple à travers un galvanomètre dont la résistance R_1 est tellement supérieure à celle du couple, qu'on peut négliger celle-ci; on mesure les intensités par la déviation de ce galvanomètre et l'on a approximativement pour les divers couples qu'on étudie

$$i = \frac{A}{R_1}, \quad i' = \frac{A'}{R_1}, \quad i'' = \frac{A''}{R_1},$$

et puisque R_1 est constant dans toutes les expériences, les intensités observées i, i', i'' mesurent proportionnellement les forces électromotrices A, A', A''.

R_1 étant nécessairement très-grand, cette méthode a l'inconvénient de réduire beaucoup l'intensité du courant et de la rendre tout à fait nulle quand le couple est très-faible. Mais on peut associer celui-ci à une pile à courant constant de n éléments dont la force est nA, et l'on obtient pour cette pile seule ou augmentée du couple

$$i = \frac{nA}{R_1}, \quad i' = \frac{nA \pm A'}{R_1}.$$

En retranchant i de i', on trouve $\pm \frac{A'}{R_1}$ qui mesure la force électromotrice du couple, dans les conditions où il est placé, et avec le signe qui convient à la direction qu'on lui a donnée.

M. Ed. Becquerel a adopté cette méthode en ce sens qu'il faisait passer le courant à travers deux bobines qui avaient une résistance trente mille fois égale à celle d'un couple de Grove ordinaire; mais il mesurait l'intensité par la balance électromagnétique qu'a imaginée son père; c'est une balance ordinaire, très-sensible, dont les plateaux supportent deux aimants de poids égaux suspendus verticalement par des fils au-dessus des deux bobines de résistance. Celles-ci sont traversées en sens inverse par le courant; l'une attire, l'autre repousse l'aimant qui lui correspond; le fléau s'incline et l'intensité i se

mesure par les poids nécessaires pour rétablir l'équilibre. La force électromotrice s'exprime dans toutes les expériences par l'intensité mesurée i, c'est-à-dire par un nombre de milligrammes.

Ce nombre de milligrammes étant variable avec la résistance des deux bobines, les intensités et les forces électromotrices sont exprimées avec une unité arbitraire. Pour la définir, M. Becquerel a étudié un couple thermo-électrique ordinaire et il a reconnu qu'avec ses appareils chaque milligramme correspond à un nombre de ces couples égal à 3,25; d'où il suit qu'en multipliant par 3,25 toutes les forces mesurées en milligrammes, elles se trouvent rapportées à celle de ce couple thermo-électrique considéré comme unité.

MÉTHODE DE WHEATSTONE. — On fait passer le courant d'un couple à travers un galvanomètre et un rhéostat, et l'on enroule le fil, 1° de R; 2° de $R + l$, jusqu'à obtenir successivement deux déviations δ et δ' qui doivent rester constantes dans toutes les expériences et qui correspondent à des intensités i et i',

$$i = \frac{A}{r+R}, \quad i' = \frac{A}{r+R+l},$$

d'où

$$\frac{1}{i'} - \frac{1}{i} = \frac{l}{A},$$

$$A = l\frac{ii'}{i-i'}.$$

Si on répète la même opération pour un autre couple A', en ajoutant au circuit des longueurs de fil R' et $R' + l'$ suffisantes pour reproduire les mêmes déviations δ et δ', on obtient de la même manière

$$A' = l'\frac{ii'}{i-i'}.$$

Or $\frac{ii'}{i-i'}$ étant constant pour tous les couples considérés, les forces électromotrices A, A',..., pourront être évaluées par les longueurs $l, l', \ldots$, du fil du rhéostat qu'il faut ajouter au circuit pour que le galvanomètre passe de la déviation δ à la déviation δ'.

M. Wheatstone a modifié sa méthode de la manière suivante, qui a ensuite été développée par MM. Lenz et Saweljev. On étudie d'abord une pile à courant constant dont la force électromotrice est nA et l'on obtient comme précédemment

$$nA = l\frac{ii'}{i-i'},$$

puis on interpose dans le circuit le couple dont on veut mesurer la force électromotrice A'. Je suppose qu'il soit tourné de manière à donner un courant opposé à celui de la pile; la force électromotrice du système sera $nA - A'$ et l'on aura par la même méthode

$$nA - A' = l'\frac{ii'}{i-i'},$$

et en retranchant $nA - A'$ de nA,

$$A' = (l - l')\frac{ii'}{i-i'}.$$

La force électromotrice A' sera donc exprimée par la différence $l - l'$ des longueurs du fil du rhéostat qu'il faut ajouter au circuit dans les deux cas considérés pour passer de la déviation δ à la déviation δ'.

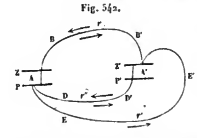
Ces divers procédés exigent à la rigueur que le couple soit constant, car s'il ne l'est pas, les liquides qu'il contient s'altèrent pendant qu'il est en activité et les deux constantes de ce couple changent progressivement. D'un autre côté, la force électromotrice effective A' que l'on mesure est complexe; elle est développée par les éléments qui constituent le couple, mais elle est diminuée par la polarisation des électrodes qui engendre un courant de réaction opposé et qui agit comme le ferait une force électromotrice inverse. Dans le cas où l'on associe le couple à une pile, le courant de cette pile change les polarisations et complique encore le phénomène.

MM. Lenz et Saweljev déterminaient directement l'effet de la polarisation et le retranchaient algébriquement du résultat mesuré. M. Ed. Becquerel, remarquant que cet effet se produit progressivement et qu'il est faible sur des lames de grande dimension, opérait avec des couples à large surface et ne mesu-

rait que l'action initiale qui est indépendante de cette cause perturbatrice; mais M. Poggendorff a imaginé la méthode suivante qui élimine toutes les altérations de la force électromotrice.

MÉTHODE DE COMPENSATION. — Soient A et A' deux couples que l'on veut comparer, le premier à action constante et le deuxième quelconque (*fig.* 542). Z et Z' représentent les deux zincs, P et P' les deux métaux inattaqués et A et A' les deux liquides. Joignons Z à Z', P à P' et Z' à P. Il est clair que l'élément A va donner deux courants, l'un qui traversera PEE'Z' et Z'B'BZP dont les résistances sont r' et r, l'autre qui passera dans PDD'Z' que nous appellerons r'', et dans r. Ces deux courants seront confondus dans la partie commune r et séparés dans les deux branches dérivées r' et r''. D'après des formules connues, on aura

Fig. 542.



$$\text{dans } r', \quad \ldots \quad i_1 = \frac{A r''}{r(r'+r'') + r'r''} = \frac{A r''}{R},$$

$$\text{dans } r'', \quad \ldots \quad i_2 = \frac{A r'}{R}.$$

De même le couple A' donnera deux courants, l'un dans r'' et r, l'autre dans r'' et r'; ils seront superposés dans r'' et leurs intensités s'exprimeront comme il suit :

$$\text{dans } r, \quad \ldots \quad i' = \frac{A' r'}{r''(r+r') + rr'} = \frac{A' r'}{R},$$

$$\text{dans } r', \quad \ldots \quad i'_1 = \frac{A' r}{R},$$

$$\text{dans } r'', \quad \ldots \quad i'_2 = \frac{A'(r+r')}{R}.$$

Les deux courants i_2 et i'_2 qui traversent r'' sont de signe contraire et l'on peut au moyen d'un rhéostat faire varier la longueur r' jusqu'à ce qu'ils soient égaux, c'est-à-dire jusqu'à ce

qu'un galvanomètre placé dans r'' ne soit pas dévié. Dans ce cas,

$$\frac{Ar'}{R} = \frac{A'(r+r')}{R} \quad \text{ou} \quad \frac{A'}{A} = \frac{r'}{r+r'}.$$

Cette condition donne un premier moyen de connaître $\frac{A'}{A}$.

D'autre part, les deux courants dérivés i_1 et i'_1 qui traversent le fil r' sont de même sens; la somme de leurs intensités pourra se mesurer par une boussole de sinus et s'exprimera par $k \sin\delta$:

$$k \sin\delta = i_1 + i'_1 = \frac{Ar'' + A'r}{R},$$

et en remplaçant A par la valeur précédente,

$$k \sin\delta = A' \frac{\frac{r+r'}{r'} r'' + r}{rr' + rr'' + r'r''} = \frac{A'}{r'} \frac{rr' + rr'' + r'r''}{rr' + rr'' + r'r''} = \frac{A'}{r'},$$

$$A' = r'.k \sin\delta.$$

Comme on connaît la boussole avec laquelle on opère, on sait quelle est la valeur de k. D'un autre côté, r' se mesure par le rhéostat et l'on trouve la valeur *vraie* de la force électromotrice A'.

On voit qu'au moment de l'observation il n'y a aucun courant dans le couple A' qui, par conséquent, ne s'altère pas et n'éprouve aucune polarisation. On mesure donc sa force électromotrice telle qu'elle est au moment considéré, en éliminant toutes les causes qui peuvent l'affaiblir.

Méthode d'opposition. — Quand on réunit par leurs pôles de même nom deux piles différentes, elles donnent des courants inverses qui traversent la somme de leurs résistances individuelles, et on a

$$i = \frac{nA - n'A'}{R + R'}.$$

La condition nécessaire et suffisante pour que l'intensité résultante soit nulle, est que nA soit égal à $n'A'$; donc on peut opposer deux piles l'une à l'autre, et faire varier le nombre des couples de l'une d'elles, jusqu'à ce que le courant total soit nul. Quand il l'est devenu, on en conclut que $nA = n'A'$. Tel est

le principe de la méthode d'opposition proposée par M. J. Regnauld.

Il prépara 60 couples thermo-électriques de bismuth et de cuivre, formés à peu près comme celui de la *fig.* 531. Toutes les tiges de bismuth avaient été coulées dans un moule commun; les fils de cuivre avaient été plongés dans le métal fondu et s'y étaient fixés pendant la solidification, sans l'intermédiaire d'aucun métal étranger. Ces éléments avaient la même force électromotrice qui fut prise pour unité; ils furent réunis en une pile dont les soudures paires ou impaires plongeaient dans deux auges, l'une pleine de glace, l'autre remplie de cire échauffée à 100 degrés par un bain d'eau bouillante. Un curseur, auquel était attaché le rhéophore négatif, glissait suivant l'axe de cette pile et permettait de la terminer à un couple quelconque de rang n, de sorte que la force électromotrice totale était égale à ce nombre n.

Cela étant, M. J. Regnauld disposa un couple suivant le modèle de ceux de Daniell, avec les éléments suivants :

zinc, sulfate de zinc | sulfate de cadmium, cadmium.

Il opposa ce couple à la pile, et chercha par tâtonnements le nombre n d'éléments de celle-ci qu'il fallait mettre en fonction pour annuler le courant. Il trouva qu'il en faut plus que 55, et moins que 56; par conséquent, la force électromotrice du couple zinc-cadmium est 55 fois égale à celle d'un élément thermo-électrique ou à 55 unités, à $\frac{1}{55}$ près.

Mais si on essayait la même expérience avec un couple de Grove, il faudrait une pile thermo-électrique beaucoup plus longue. Pour éviter d'en multiplier les éléments, M. Regnauld prend comme unité intermédiaire le couple zinc-cadmium; il en fait une pile de 1, 2, 3,..., n éléments; il l'oppose au couple qu'il s'agit d'étudier, et reconnaît par la même méthode que la force électromotrice A de ce couple est comprise entre m et $m+1$ fois celle de l'unité intermédiaire, ou entre $m55$ et $(m+1)55$. Ensuite, pour préciser la mesure, il oppose au même couple m éléments zinc-cadmium, et n éléments de la pile thermo-électrique jusqu'à annuler le courant produit; alors il obtient

$$A = m55 + n.$$

Telles sont les méthodes qu'on a employées; voyons maintenant les résultats auxquels elles ont conduit. Elles ont conduit d'abord à l'évaluation de la force électromotrice des couples les plus usuels, et ensuite à l'étude approfondie des circonstances au milieu desquelles se produit cette force.

FORCE ÉLECTROMOTRICE RELATIVE DES COUPLES USUELS. — 1°. La nature des liquides exerce une influence évidente sur l'énergie de la force électromotrice; mais ce à quoi l'on ne pouvait s'attendre, c'est qu'une fois cette nature déterminée, le degré de concentration des sels qui enveloppent la lame positive (cuivre), ou des acides qui baignent le zinc, peut varier dans des proportions très-considérables sans changer sensiblement la valeur de A; il n'a d'effet que sur la résistance propre du couple dont il change la conductibilité.

2°. Les deux métaux qui entrent dans la composition d'un couple ont chacun leur influence particulière, qui sera étudiée bientôt. Quand l'un deux est du zinc, A est généralement très-grande; elle augmente si on amalgame ce métal, mais cette augmentation ne change pas avec la quantité de mercure; il en est de même quand on prend des amalgames de potassium ou de sodium.

3°. Tous les couples à courant constant contiennent un diaphragme poreux qui sépare les deux liquides; son épaisseur, son degré de porosité, sa nature, influent sur la conductibilité du couple, mais nullement sur la force électromotrice, à moins qu'il ne soit attaqué par l'un des deux liquides.

4°. La théorie de Ohm, confirmée par les expériences de M. Kohlrausch, nous apprend que la force électromotrice résulte des tensions contraires que prennent les éléments opposés d'un couple; elle doit donc être indépendante de l'étendue des surfaces comme les tensions elles-mêmes. C'est ce qu'a vérifié M. Wheatstone avec des couples identiquement disposés, mais dont les dimensions étaient extrêmement différentes. Il a fallu pour chacun d'eux augmenter la résistance de 30 tours du rhéostat pour faire passer la déviation du galvanomètre de 45 à 40 degrés. La méthode de M. J. Regnauld montre avec plus d'exactitude et de simplicité que ces couples s'annulent quand on les oppose.

On voit en résumé que la force électromotrice change avec la constitution des couples, c'est-à-dire avec la nature des liquides et des métaux, mais qu'elle ne dépend ni du degré de concentration des solutions, ni du diaphragme, ni de la proportion du mercure dans l'amalgame, ni enfin de la grandeur des surfaces; par conséquent, elle est déterminée quand on connaît seulement la nature des liquides et des métaux, et on peut la déterminer une fois pour toutes. Voici les valeurs qu'elle atteint dans les divers couples, en prenant comme unité le couple thermo-électrique.

COMPOSITION DES COUPLES.	DÉSIGNATION des couples.	A	
		J. Regnauld.	Ed. Becquerel.
Couple thermo-électrique..................	....	1	1
Zinc pur........ SO^4Zn | SO^4Ca . Cadmium.	Zinc-cadmium.	55	"
Zinc pur........ SO^4HO .... Cuivre. .	Wollaston.....	"	99
Zinc pur........ SO^4HO......... Platine...	Smée.........	"	121
Zinc amalgamé. | SO^4Cu....... Cuivre. .	Wheatstone...	153	"
Zinc pur........ SO^4Zn | SO^4Cu. Cuivre. .	Daniell.......	175	"
Zinc amalgamé. . SO^4HO | SO^4Cu. Cuivre. .	Daniell.....	179	187
Zinc amalgamé. . SO^4HO | AzO^5... Platine...	Grove.........	310	326
Zinc amalgamé. . SO^4HO | AzO^5... Charbon..	Bunsen.......	"	319
Potassium amalg. Ch Na | AzO^5... Platine...	....	416	"

FORCES ÉLECTROMOTRICES VRAIES. — Mais il ne suffit pas d'avoir comparé les forces électromotrices à celle d'un couple choisi arbitrairement, il faut calculer leurs valeurs vraies, c'est-à-dire celles qui satisfont à la formule $i = \frac{A}{R}$, dans laquelle on mesure l'intensité i par le poids d'hydrogène dégagé en 1 minute, et la résistance R par la longueur d'un fil de mercure de section égale à 1 millimètre. Or M. Pouillet a trouvé que le courant qui décompose 1 gramme d'eau en 1 minute, ou qui dégage $\frac{1}{9}$ de gramme d'hydrogène, et dont l'intensité est égale à $\frac{1}{9}$, est 13787 fois plus fort que celui qui est donné par un couple thermo-électrique à travers 20 mètres de cuivre de 1 millimètre de diamètre; donc l'intensité i_1 de ce dernier est

$\frac{1}{9.13787} = \frac{1}{124083}$, et la résistance $\frac{l}{sc}$ du circuit qu'il traverse est égale à $\frac{20}{\frac{\pi}{4}(49,45)} = 0,5150$, et comme la force électromotrice vraie A_1 du couple thermo-électrique est égale au produit de l'intensité i_1 par la résistance $\frac{l}{sc}$, on a

$$A_1 = \frac{0,5150}{124083} = 0,0000005147.$$

Connaissant maintenant la force électromotrice vraie A_1 à laquelle on a comparé les autres, on obtiendra les forces électromotrices vraies de tous les autres couples, en multipliant par A_1 les nombres écrits dans le tableau précédent.

Si l'on veut calculer l'intensité $i = \frac{nA}{R + nr}$ du courant donné par une pile, il faut non-seulement avoir déterminé A, mais aussi la résistance propre r de chaque couple; or r, variant avec la concentration des liquides, avec l'étendue et la distance des deux métaux, ne peut être déterminée que par une étude spéciale des couples particuliers qu'on veut employer. Mais on pourra la calculer si on connaît toutes les dimensions du couple et la conductibilité des deux liquides, et cela fait, la formule $i = \frac{nA}{R + nr}$ permettra d'obtenir avec assez d'exactitude pour une première approximation le poids i d'hydrogène que dégagerait la pile pendant 1 minute, à travers tout circuit extérieur dont la résistance R serait connue. Ainsi, grâce aux déterminations que nous avons faites des conductibilités et des forces électromotrices, les effets d'une pile peuvent se calculer à l'avance en fonction de coefficients connus. C'est un premier but pratique qu'il était nécessaire d'atteindre. Il y a maintenant un autre problème à résoudre qui a plus d'importance théorique : il faut savoir quelles lois suivent les forces électromotrices dans leur développement au milieu des couples d'une pile. Nous allons résumer le peu que l'on sait sur ce sujet.

FORCE RÉSULTANTE. — La force électromotrice développée dans les couples, même les plus simples, est toujours l'effet

d'actions complexes; elle est la résultante de plusieurs forces élémentaires qui naissent à chaque contact; nous allons les analyser et chercher comment elles se composent en une seule. Nous examinerons d'abord le cas où l'on plongerait dans l'eau acidulée une lame de zinc Zn et un métal CB que nous supposerons inactif; l'action serait représentée par le symbole suivant :

$$\underset{-e \qquad\qquad +e}{\overline{Z \qquad\qquad B}} \;\Big|_{A}^{A}\; \underset{-\quad+\quad-\quad+}{SO^4H\;SO^4H} \;\ldots\; \underset{-\quad+\quad-\quad+}{SO^4H\;SO^4H}\; \underset{-e \qquad\qquad +e}{\overline{C \qquad\qquad B}}$$

C'est-à-dire que la force électromotrice naîtrait en AA, que le fluide neutre serait décomposé, et que des quantités $-e$ et $+e$ des deux fluides se porteraient par influence aux extrémités antérieures et postérieures du zinc Zn, de chaque molécule SO^4H et du métal CB, et que la différence des tensions extrêmes qui mesure la force électromotrice, serait $2e$.

Si on remplaçait le zinc par un métal inactif B'C', et BC par du cuivre, on aurait une action inverse, une orientation opposée, une différence de tension $2e'$ qui serait moindre, et une force électromotrice plus faible, naissant en A'A,

$$\underset{+e' \qquad\qquad -e'}{\overline{B' \qquad\qquad C'}}\; \underset{+\quad-\quad+\quad-}{H\,SO^4\;H\,SO^4} \;\ldots\; \underset{+\quad-\quad+\quad-}{H\,SO^4\;H\,SO^4} \;\Big|_{A'}^{A'}\; \underset{+e' \qquad\qquad -e'}{\overline{C \qquad\qquad B}}$$

Mais si l'on constitue un couple avec du zinc et du cuivre, il est naturel de penser que les deux effets précédents se superposeront, que les deux métaux tendront à produire des actions opposées et à orienter le liquide dans des sens contraires, que les deux forces électromotrices agiront à la fois en AA et A'A', qu'elles se retrancheront, puisqu'elles sont contraires, et que les tensions extrêmes seront égales à la différence de celles qui se produisaient dans les deux cas précédents. On aura

$$\underset{-(e-e') \qquad +(e-e')}{\overline{Z \qquad\qquad\qquad B}} \;\Big|_{A}^{A}\; \underset{-\quad+\quad-\quad+}{SO^4H\;SO^4H} \;\ldots\; \underset{-\quad+\quad-\quad+}{SO^4H\;SO\,H} \;\Big|_{A'}^{A'}\; \underset{-(e-e') \qquad +(e-e')}{\overline{C \qquad\qquad\qquad B}}$$

Or comme rien n'autorise à affirmer qu'il y ait des métaux inactifs, même l'or et le platine, la force électromotrice effective d'un couple simple quelconque n'est en réalité que la différence de celles qui se développent individuellement au contact du liquide avec les deux métaux.

La même chose aura lieu si nous étudions deux liquides comme la soude et l'acide sulfurique, avec deux électrodes CB, C'B' que nous supposerons inactives. Il est probable qu'il y a une force électromotrice en A″A″ au contact des deux liquides, qu'elle oriente les molécules et qu'elle produit une différence de tension $2e''$:

$$\underset{-e''}{B}\overline{}\underset{+e''}{C}\ \underset{-}{O}\,\underset{+}{Na}\ \underset{-}{O}\,\underset{+}{Na}\ \overset{A''}{\underset{A''}{\Big|}}\ \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H}\ \underset{-}{SO^4}\,\underset{+}{H}\ \underset{-e''}{C'}\overline{}\underset{+e''}{B'}$$

Si nous remplaçons l'électrode BC qui plonge dans la soude par du potassium, elle ajoutera son action à celle des deux liquides et augmentera la force électromotrice $2e''$ de celle qu'elle détermine, ou de $2e'$; et enfin si on introduit du zinc dans l'eau acidulée au lieu de C'B', il produira une force électromotrice inverse égale à $2e$, qui se retranchera. La force résultante A' sera donc $2e'' + 2e' - 2e$. En général, si un couple est formé de deux liquides L et L', et de deux métaux l'un R placé dans L, l'autre R' plongeant dans L', la force électromotrice totale A' sera égale à la somme algébrique de celles qui se produisent : 1° au contact de R et de L ; 2° au contact de L et de L' ; 3° au contact de R' et de L'. Nous représenterons conventionnellement ces trois forces par R, L, par L, L', par R', L' et en général en écrivant à la suite l'une de l'autre les formules chimiques des deux substances en contact. Nous aurons alors pour la force électromotrice effective

$$A' = R, L + L, L' - R', L'. \tag{1}$$

Enfin, si le couple est traversé par le courant d'une pile, sa force électromotrice A' s'ajoutera à celle de cette pile qui est A ou elle s'en retranchera ; mais il se produira un nouveau phénomène. Des gaz se dégageront aux deux électrodes R et R', les polariseront et feront naître chacun deux forces électromotrices de polarisation, l'une R, O provenant de l'oxygène dégagé sur le premier métal, l'autre R', H développée par l'hydrogène sur le second. On aura donc pour la force électromotrice totale P de la pile augmentée du couple

$$P = A \pm A' - R, O - R', H,$$

$$P = A \pm (R, L + L, L' - R', L') - R, O - R', H. \tag{2}$$

Le second terme devra être pris avec le signe + ou le signe — suivant que le couple considéré agira dans le sens de la pile ou dans le sens opposé.

Cette formule est fondamentale; mais comme elle résulte de considérations tout à fait hypothétiques, notre premier soin doit être de montrer qu'elle est confirmée par toutes les expériences.

I. M. Poggendorff prit une pile à courant constant, dont il mesura la force électromotrice A, puis il y ajouta un couple simple de zinc et de platine dont la force électromotrice était A' et qui fut mis d'abord en concordance, ensuite en opposition avec la pile. On obtient, dans les deux cas, deux forces électromotrices totales P et P' qui doivent être

$$P = A + A' - \mathrm{Pt, H}, \qquad P' = A - A' - \mathrm{Pt, O} - \mathrm{Zn, H};$$

d'où l'on tire

$$A - P + A - P' = \mathrm{Pt, H} + \mathrm{Pt, O} + \mathrm{Zn, H} = \alpha.$$

On remplaça les deux métaux du couple d'abord par deux lames de platine, ensuite par deux lames de zinc, ce qui donna deux nouvelles forces, P_1, P'_1 :

$$P_1 = A - \mathrm{Pt, H} - \mathrm{Pt, O}, \qquad P'_1 = A - \mathrm{Zn, H}$$
$$A - P_1 + A - P'_1 = \mathrm{Pt, H} + \mathrm{Pt, O} + \mathrm{Zn, H} = \alpha.$$

Les deux valeurs de α ainsi déterminées furent sensiblement égales. Par conséquent, les forces de polarisation, celles d'un couple et celles d'une pile s'ajoutent comme la formule (2) l'indique.

II. M. Ed. Becquerel plaça un vase poreux dans un bocal de verre, puis il versa d'abord de l'acide azotique, ensuite de l'acide sulfurique dans les deux compartiments et enfin de l'acide sulfurique dans l'un et de l'acide azotique dans l'autre. Au moyen d'électrodes en platine il fit passer le courant d'une pile connue à travers cette double cellule et détermina dans chaque cas la force électromotrice totale P, comme on vient de le faire précédemment. Si on désigne par $\mathrm{Pt, O_{AzO^5}}$ et par $\mathrm{Pt, O_{SO^3}}$ celles de l'oxygène dans les acides azotique et sulfurique, par $\mathrm{Pt, H_{SO^3}}$ celle de l'hydrogène dans l'acide sulfurique, et enfin par SO^3, AzO^5 celle qui résulte de l'action des deux acides, on peut

exprimer les résultats par le tableau suivant où les flèches indiquent le sens du courant.

Composit. du couple.		$R, O + R', H - A'$	=	$A - P$
$Pt \ldots SO^3 \mid AzO^5 \ldots Pt$	⇢	$Pt, O_{SO^3} - A'$	$= 34,00$	100,25
$Pt \ldots AzO^5 \mid SO^3 \ldots Pt$	⇢	$Pt, O_{AzO^5} + Pt, H_{SO^3} + A'$	$= 66,25$	
$Pt \ldots SO^3 \mid SO^3 \ldots Pt$	⇢	$Pt, O_{SO^3} + Pt, H_{SO^3}$	$= 91,18$	99,68
$Pt \ldots AzO^5 \mid AzO^5 \ldots Pt$	⇢	Pt, O_{AzO^5}	$= 8,50$	

et s'il est vrai que les forces de polarisation s'ajoutent et se retranchent ainsi que l'indique la formule (2) et le tableau, la somme des deux premières équations doit être égale à celle des deux dernières, ce qui en effet est très-sensiblement vérifié.

III. Par sa méthode de compensation M. Poggendorff étudia trois couples simples : le premier zinc et cuivre, le deuxième zinc et fer, le troisième fer et cuivre. Ils plongeaient dans une auge unique contenant de l'acide sulfurique étendu. Comme il n'y a qu'un liquide, le terme L, L' est nul, et puisque d'après la méthode même ces couples n'entrent point en activité, il n'y a pas à s'occuper de la polarisation. La formule (1) se réduit à

$$A' = R, SO^3 - R', SO^3.$$

On a trouvé

Composition du couple.	$R, SO^3 - R', SO^3$ =	A'	
Zinc ... SO^3, HO ... Cuivre.	$Zn, SO^3 - Cu, SO^3$ =	13,792	
Zinc ... SO^3, HO ... Fer.	$Zn, SO^3 - Fe, SO^3$ =	7,399	13,399
Fer ... SO^3, HO ... Cuivre.	$Fe, SO^3 - Cu, SO^3$ =	6,000	

La première équation doit être égale à la somme des deux autres, ce qui est vrai.

IV. MM. Lenz et Saweljev ont mesuré par le second procédé de Wheatstone les forces électromotrices de combinaisons très-variées parmi lesquelles nous citerons les suivantes :

Composit. du couple.	A'	Composit. du couple.	A''	$A' - A''$
$Zn \ldots SO^3 \mid AzO^5 \ldots Pt$	4,29	$Zn \ldots SO^3 \mid SO^4Cu \ldots Cu$	2,17	2,12
$Fe \ldots SO^3 \mid AzO^5 \ldots Pt$	3,01	$Fe \ldots SO^4 \mid SO^3Cu \ldots Cu$	0,89	2,12
$St \ldots SO^3 \mid AzO^5 \ldots Pt$	2,01	$St \ldots SO^3 \mid SO^4Cu \ldots Cu$	1,06	1,95
$Zn \ldots KO \mid AzO^5 \ldots Pt$	5,49	$Zn \ldots KO \mid SO^4Cu \ldots Cu$	3,50	1,99

Si l'on calcule la différence $A' - A''$ des forces électromo-

trices placées sur une même ligne horizontale, on doit obtenir un nombre constant, car tous les couples écrits en regard ont le même métal négatif dont l'influence disparaît par la soustraction, et comme dans ces exemples l'action réciproque des liquides est très-faible ou égale, la différence $A' - A''$ est sensiblement égale à la force électromotrice du couple suivant :

$$\text{Cu} \ldots \text{SO}^4\text{Cu} \mid \text{AzO}^5 \ldots \text{Pt.}$$

La force électromotrice de ce couple a été mesurée directement et trouvée égale à 2,02, qui diffère peu des valeurs de $A' - A''$.

Après ces vérifications, qu'il serait facile de multiplier, la formule (2) peut être considérée comme justifiée. Outre qu'elle sera d'un grand secours dans les déterminations qui vont suivre, elle entraîne une conséquence capitale qui a été signalée par M. Poggendorff. Elle montre qu'en éliminant la polarisation des électrodes, la force électromotrice A' d'un couple intercalé dans le circuit d'une pile reste la même quel que soit son sens, c'est-à-dire quand le métal négatif du couple se dissout ou non ; d'où il faut conclure, 1° que *l'acte* de la combinaison chimique n'est pas la cause du développement de l'électricité dans ce couple ; 2° que si cette cause est chimique, il faut l'attribuer à une affinité de tendance ; 3° qu'on peut tout aussi bien la rapporter à une force physique spéciale qui, au contact des corps hétérogènes, décomposerait le fluide neutre. Nous voici ainsi ramenés par une tout autre voie à la dernière des théories par laquelle on explique le développement des courants.

Je vais montrer maintenant comment, avec le secours de la formule (2), on peut isoler et étudier séparément les forces électromotrices élémentaires qui dans un couple se composent en une résultante unique.

FORCE ÉLECTROMOTRICE DE POLARISATION. — Ce sujet a été étudié par un grand nombre d'observateurs, par MM. Wheatstone, Poggendorff, Lenz et Saweljev, Swamberg, Beetz et Ed. Becquerel.

M. Wheatstone mesurait en tours du rhéostat la force électromotrice d'une pile à courant constant de n couples ; cette

force était nA avec un circuit métallique, elle se réduisait à A' quand on interposait un voltamètre. La différence $(nA - A')$ donnait la force électromotrice p de polarisation dans le voltamètre. M. Wheatstone trouva ainsi :

Nombre de couples.	Sans voltamètre.	Avec voltamètre.	Différence.
n	nA	A'	$nA - A' = p$
3	90	21	69
4	120	50	70
5	150	79	71
6	180	109	71

D'où il suit que la force de polarisation est un peu supérieure à celle de deux des couples employés. Ces couples étaient constitués par un vase poreux rempli d'amalgame de zinc, plongé dans du sulfate de cuivre et entouré d'un cylindre de cuivre.

M. Ed. Becquerel obtint la valeur des forces de polarisation de l'oxygène et de l'hydrogène sur le platine au moyen des équations de la page 151 ; en y remplaçant A' par sa valeur que nous déterminerons bientôt et qui est égale à $19^{mg},56$: on trouve

$$\begin{aligned} Pt,\ O_{Az O^5} \ldots\ldots\ldots &= \overset{mg}{8,50} \\ Pt,\ O_{SO^3} \ldots\ldots\ldots &= 53,56 \\ Pt,\ H_{SO^3} \ldots\ldots\ldots &= 37,62 \\ Pt,\ O_{SO^3} + Pt,\ H_{SO^3} &= 91,18 \end{aligned}$$

Le même physicien détermina les forces de polarisation des divers métaux dans l'hydrogène par un procédé plus simple. Il forma divers couples avec deux lames, l'une de zinc amalgamé, l'autre du métal qu'il voulait étudier; toutes deux avaient 10 centimètres carrés et plongeaient dans une solution de 9 parties d'eau et de 1 partie d'acide sulfurique. Il associait ces couples à une pile de 10 éléments de Bunzen et mesurait en milligrammes les forces électromotrices $A + A'$ du système et A de la pile seule, d'où il concluait A'. Il faisait deux mesures successives de A', l'une rapidement, ce qui lui donnait la force A'_1 avant toute polarisation, l'autre A'_2 après que cette polarisation s'était produite, et $A'_1 - A'_2$ exprimait la force de polarisation du métal considéré recouvert d'hydrogène.

Tableau N° 1.

COUPLES ZINC AMALGAMÉ ET	FORCES ÉLECTROMOTRICES		
	AVANT LA POLARISATION. A'_1	APRÈS LA POLARISATION. A'_2	DE POLARISATION PAR L'HYDROGÈNE. $A'_1 - A'_2$
	mg	mg	mg
Or	75,75	29,87	48,88
Platine	78,75	35,37	43,38
Argent	68,25	28,50	39,75
Mercure	57,25	17,50	39,75
Cuivre	51,75	24,25	27,50
Zinc amalgamé	00,00	— 2,00	2,00
Zinc pur	00,25	— 2,00	1,75

Toutes ces forces sont exprimées par les poids qu'il faut mettre dans la balance pour rétablir l'équilibre; mais on peut les ramener aux unités de M. J. Regnauld en se rappelant (page 140) que chaque milligramme équivaut à un nombre de couples thermo-électriques égal à 3,25.

Ces premiers résultats nous conduisent à une importante conséquence. On sait qu'un couple zinc-cuivre ordinaire ou un couple de Daniell ne suffisent pas pour décomposer l'eau dans un voltamètre : il en faut au moins deux; tandis qu'un seul élément de Grove suffit. Cela tient à ce que les couples commencent par polariser les électrodes du voltamètre en faisant naître une force de polarisation qui se retranche de leur force électromotrice et il faut nécessairement que celle-ci soit supérieure à celle-là pour que l'électrolysation puisse continuer. D'où il suit, d'après les résultats de M. Wheatstone, qu'il faut au moins trois de ses couples pour décomposer l'eau.

On remarquera aussi par le dernier des tableaux précédents que la polarisation du cuivre par l'hydrogène est très-considérable. Dans le cas de la pile de Wollaston la force initiale, qui est 51,75, baisse à 24,25 par l'effet de la polarisation : elle diminue de plus de moitié; la pile de Smee est dans le même cas. Il est donc très-important de choisir pour métaux positifs ceux sur lesquels l'hydrogène produit une polarisation très-faible; c'est pour cette raison que Sturgeon a remplacé le

cuivre par du fer. Il diminue par là la force électromotrice initiale A′ du couple; mais cette perte est compensée par la diminution de la polarisation.

VARIATION DE LA FORCE DE POLARISATION. — Les nombres par lesquels M. Becquerel a exprimé les polarisations des gaz se rapportent au cas bien défini où les lames avaient 10 centimètres carrés de surface, où le courant était donné par 10 éléments de Bunsen et où le liquide était étendu de 9 parties d'eau. Si ces conditions changent, les nombres changent eux-mêmes. Voici les résultats donnés par des voltamètres différents avec des courants d'intensité variable.

DIMENSION DES LAMES.	NOMBRE DES COUPLES.	FORCES DE POLARISATION DANS LE VOLTAMÈTRE	
		REMPLI D'ACIDE SULFURIQUE AU 10°.	REMPLI D'ACIDE AZOTIQUE.
PLATINE.		millig	millig
60mm 40mm	1	73,0	18,5
"	2	96,5	"
"	4	101,0	47,5
PLATINE.			
40mm 10mm	1	85,0	43,5
"	2	110,0	"
"	4	126,0	53,5
OR.			
40mm 20mm	1	92,0	51,0
"	2	131,0	"
"	4	136,5	69,0

Ces expériences et beaucoup d'autres que nous ne rapporterons pas conduisent aux remarques suivantes :

1°. La force de polarisation p augmente avec l'intensité du courant. Elle peut se représenter pour des lames et un liquide donnés par la formule

$$p = m + ni + pi^2.$$

2°. Elle diminue quand la surface des lames augmente. Cela tient à ce que le courant total se divise entre les lames en une infinité de rameaux d'autant plus faibles que les surfaces sont plus grandes.

3°. Elle change avec les métaux; elle change aussi avec la nature des liquides : par exemple elle est, sur une électrode positive de platine, égale à 53^{mg},56 dans l'acide sulfurique et à 8^{mg},50 dans l'acide azotique.

4°. Quand un seul des deux gaz est dégagé, il engendre une force électromotrice propre; quand tous les deux sont mis en liberté, ils produisent une action totale égale à la somme de leurs actions individuelles.

5°. La force de polarisation augmente dans le vide, surtout avec des électrodes de platine ou d'or, et par suite l'intensité du courant diminue. Ce fait résulte de ce que, dans l'air, l'oxygène se combine avec l'hydrogène accumulé par polarisation sur l'électrode négative et produit une dépolarisation partielle qui cesse dans le vide. C'est à cette cause qu'il faut attribuer deux faits connus depuis longtemps, 1° l'absorption de l'oxygène de l'air par les cuivres d'une pile à un seul liquide; 2° la diminution de l'intensité du courant quand on met la pile dans le vide.

Puisque la force de polarisation est variable avec l'intensité du courant et avec tous les éléments qui constituent le voltamètre, on ne peut l'exprimer par un nombre applicable à tous les cas. Quand on aura besoin de la connaître dans des conditions données, il faudra la mesurer directement.

FORCE ÉLECTROMOTRICE DES PILES A GAZ. — Quand on décompose de l'eau dans un voltamètre disposé comme celui de la *fig.* 505, l'oxygène et l'hydrogène s'accumulent dans les cloches; si ensuite on supprime la pile et qu'on réunisse les deux électrodes entre elles, le voltamètre devient un couple à gaz de Grove, et la force de polarisation des deux gaz est la force électromotrice de ce couple. Celle-ci est donc variable comme celle-là.

On reconnaît qu'une pile de Grove que l'on a chargée de gaz en décomposant l'eau par un courant au moyen des lames de platine elles-mêmes, a une plus grande force que si on la pré-

pare en introduisant dans les cloches de l'oxygène et de l'hydrogène ordinaires. Cela tient vraisemblablement à trois causes : 1° à ce que les gaz dégagés par les électrodes contiennent de l'ozone ; 2° à ce que le passage du courant nettoie le platine ; 3° à ce que ce courant détermine une condensation de gaz plus grande, et une force de polarisation d'autant plus considérable qu'il est plus intense.

La force électromotrice d'une pile à gaz diminue pendant qu'elle fonctionne. En effet les deux couches de gaz qui étaient à l'origine condensées sur les électrodes, se transforment en eau pendant le passage du courant. Elles tendent à se reproduire ensuite, mais comme elles sont détruites aussitôt que reformées, elles ne reprennent leur condensation première que si on ouvre le circuit pendant quelque temps; alors la pile reprend pendant le repos son activité initiale.

M. Beetz a mesuré les forces électromotrices d'un couple à gaz en combinant avec une lame entourée d'hydrogène une seconde lame enveloppée d'un autre gaz ou même plongée dans l'eau. Voici quelques résultats ramenés par le calcul aux unités de M. Becquerel :

Platine ... Hydrogène	Platine seul.........		mg 34,23
Platine ... Hydrogène	Cuivre seul.........		6,50
Platine ... Hydrogène	Oxygène ...	Platine.	40,77
Platine ... Hydrogène	Chlore ...	Platine.	53,54

Il paraît démontré par le premier de ces exemples que dans un couple à gaz, l'hydrogène dans son contact avec le platine produit une force électromotrice propre égale à 34 milligrammes; il se conduit comme le zinc dans l'eau acidulée. D'autre part, et d'après le troisième exemple, quand l'oxygène est accumulé sur la lame opposée, il augmente la force électromotrice de 34 à 41 milligrammes; il en fait donc naître une seconde qui s'ajoute à la première. Ces deux effets sont distincts et indépendants. Ce n'est donc pas la tendance à la combinaison des deux gaz qui développe la force électromotrice, ce sont deux actions qui se produisent au contact de chacun d'eux avec le platine, et comme il ne peut être ici question d'affinité, il faut bien attribuer l'action électrique à une force de contact.

FORCE ÉLECTROMOTRICE AU CONTACT DES LIQUIDES. — Je suppose que l'on forme une combinaison de deux liquides L, L' séparés par une cloison poreuse, qu'on plonge deux lames inattaquables d'or ou de platine dans les deux compartiments, et qu'on mesure la force électromotrice. Généralement il y aura une polarisation des électrodes, mais on pourra ou la mesurer et la retrancher du résultat, comme faisaient MM. Lenz et Sawelgev, ou opérer rapidement et avec des lames très-larges, afin qu'elle soit faible et n'ait pas le temps de s'établir, ou bien suivre la méthode de M. Poggendorff, qui ne lui permet pas de se produire. Soit A' cette force électromotrice corrigée

$$A' = \text{Pt, L} + \text{L, L'} - \text{Pt, L'}.$$

Il est évident que le résultat étant la somme algébrique de trois quantités, on ne pourrait obtenir L, L' que si Pt, L et Pt, L' étaient connues. Le problème est donc indéterminé.

M. Ed. Becquerel admet que les forces électromotrices du platine, de l'or, et en général des substances inattaquables, sont nulles ou au moins égales dans la plupart des liquides; cela paraît probable, mais n'est point démontré, et dans quelques cas c'est inexact. Par exemple, si les liquides sont de la potasse et de l'acide azotique, on obtient avec des électrodes de platine, d'or, d'argent ou de charbon :

Platine.	Or.	Argent.	Charbon.
55,50 mg	44,50 mg	44,50 mg	60,50 mg

il est clair que ces substances agissent inégalement et ajoutent leur effet à celui des liquides en contact.

D'un autre côté, MM. Lenz et Saweljev considèrent comme évident que les liquides sont sans action l'un sur l'autre, que L, L' est nul, et que A' mesure la différence entre les forces électromotrices des deux métaux dans les deux liquides. Cette hypothèse n'est pas plus démontrée que la précédente, elle est probablement inexacte dans le cas où on considère la potasse et l'acide sulfurique.

On ne peut se prononcer entre des opinions aussi opposées, mais on ne court aucun risque d'erreur en admettant qu'il y a trois forces électromotrices Pt, L; L, L'; Pt, L'. Voici

les résultats de M. Ed. Becquerel. Ils expriment l'action des deux liquides augmentée de la différence de celles des deux lames de platine qui y sont plongées.

TABLEAU N° 2.

Action de deux dissolutions.

Solution négative.	Solution positive.	Force électromotrice.
		mg
Sulfate de cuivre saturé...	Eau acidulée par SO^3 au 10e.	5,50
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Eau oxygénée............	7,50
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Chlorure de platine saturé.	7.75
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Acide azotique pur........	19.25 à 21
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Acide chromique..........	27,80
Eau acidulée par SO^3 au 10e.	Eau chlorée saturée.......	37,25
Acide chlorhydrique......	Acide azotique pur........	52,50
Potasse..................	Acide azotique pur........	55,50
Persulfure de potassium...	Acide azotique pur........	72,50

La force totale d'un couple de Grove est représentée par 98 milligrammes, les deux liquides y entrent pour 20 milligrammes, c'est-à-dire pour $\frac{1}{5}$; celle de l'élément de Daniell est 58 milligrammes, les deux liquides agissent en sens opposé, et la réduisent de $\frac{1}{10}$ environ. Nous dirons en terminant que l'action des liquides entre eux est variable avec la température et le degré de concentration.

FORCE ÉLECTROMOTRICE AU CONTACT DES LIQUIDES ET DES MÉTAUX. — La plus simple des méthodes qu'on puisse choisir pour comparer les forces électromotrices des métaux a été suivie par M. Ed. Becquerel. Il étudiait des couples formés par une première lame de platine Pt et par une seconde lame d'un métal quelconque R plongeant toutes deux dans le même liquide L; il mesurait la force électromotrice initiale A' du couple qui est évidemment égale à la différence de celles des deux métaux

$$A' = R, L - Pt, L.$$

Mais on retrouve dans cette question la même indétermination que dans la précédente; il est impossible de mesurer la force absolue R, L d'un métal quelconque. On ne peut que trouver la différence entre celle-ci et celle du métal le moins actif

qui est le platine. Voici le tableau des principaux résultats obtenus par M. Ed. Becquerel : ils sont, comme précédemment, exprimés en milligrammes.

TABLEAU N° 3.

	EAU DISTILLÉE.	EAU CHLORÉE.	EAU, 500. SO^3HO, 1	EAU, 9. SO^3HO, 1	EAU, 10. HCl, 1.	EAU, 4. KO, 1.	EAU, 5. KS^2, 1.	EAU, 20. CyK, 1.
Amalg. de potassium	"	165,50	"	137,32	"	"	"	"
Zinc amalgamé.....	"	"	81,50	81,75	82,75	81,00	"	77,00
Zinc pur..........	31,50	108,75	78,25	79,25	81,00	78,00	13,50	77,00
Cadmium..........	"	96,00	61,00	62,75	66,75	55,00	"	"
Plomb...	21,00	81,50	52,75	52,75	53,25	50,00	3,50	"
Étain............	"	82,60	51,25	52,25	53,75	67,25	"	17,00
Fer...............	17,50	83,00	50,75	48,75	49,75	50,0?	"	29,00
Aluminium........	"	"	45,00	40,75	66,75	85,00	"	"
Nickel............	"	"	34,00	35,75	38,75	24,0?	o	"
Cobalt........	"	"	35,00	34,75	37,75	31,0?	"	"
Bismuth...........	"	50,00	26,00	29,50	33,00	36,00	"	"
Antimoine..... ..	"	53,00	26,00	27,75	28,75	48,25	"	"
Cuivre............	10,00	61,00	26,00	27,75	36,75	33,00	9,50	71,00
Argent.	"	55,25	9,50	17,25	27,25	o	7,50	42,00
Mercure...........	"	"	"	25,00	"	"	"	"
Or..........	"	10,00	"	o	"	o	"	48,00
Platine...........	o	o	o	o	o	10,0?	o	o

Au point de vue pratique, les tableaux n° 1, n° 2, n° 3 suffisent pour calculer la force électromotrice d'un couple quelconque. Considérons par exemple celui de Wollaston : on aura

$$A = Zn,\ SO^3 - Cu,\ SO^3 - Cu,\ H$$
$$= (Zn,\ SO^3 - Pt,\ SO^3) - (Cu,\ SO^3 - Pt,\ SO^3) - Cu,\ H.$$

Le premier et le second terme expriment les forces électromotrices de deux couples zinc platine, cuivre platine, dans l'acide sulfurique étendu, ils sont écrits dans le dernier tableau, et sont égaux à $81^{mg},75$ et à $27^{mg},75$; leur différence $54^{mg},00$ donne la force électromotrice initiale du couple de Wollaston. Quand la polarisation Cu, H s'est établie, il faut la retrancher; elle est égale à $27^{mg},50$ d'après le tableau n° 1, lorsque les lames de cuivre ont 10 centimètres carrés, et pour

un courant de certaine intensité; elle réduit la force du couple à $26^{mg},50$. Cette force est exprimée en milligrammes, mais en la multipliant par 3,25 on la ramène au couple thermo-électrique, ce qui donne 86,12, et enfin, comme on connaît la force électromotrice vraie de ce couple unité, on peut calculer celle de l'élément de Wollaston.

Mais comme la polarisation diminue quand l'étendue des lames augmente, la force électromotrice de ce couple sera d'autant plus grande que sa surface sera plus considérable. C'est un fait qui est connu depuis longtemps.

Si on veut calculer de même un couple à deux liquides, comme celui de Grove, on trouve

$$A = Zn,\ SO^3 + SO^3,\ AzO^5 - Pt,\ AzO^5$$
$$= (Zn,\ SO^3 - Pt,\ SO^3) + (Pt,\ SO^3 + SO^3,\ AzO^5 - Pt\,AzO^5\ .$$

Le premier terme est $81^{mg},75$, le second exprime l'action de l'acide azotique sur l'acide sulfurique avec deux électrodes de platine; elle est égale à 20, d'après le tableau n° 2. La somme est $101^{mg},75$; l'expérience donne 99 milligrammes. On passera comme précédemment de ce nombre à la force électromotrice vraie.

Ces tableaux n° 1, n° 2, n° 3 nous permettent par conséquent de calculer la force électromotrice d'un très-grand nombre de couples qu'on pourrait se proposer de construire. Il faut maintenant chercher s'il existe quelque relation expérimentale entre ces diverses forces.

LOIS DES FORCES ÉLECTROMOTRICES. — M. Wheatstone composa des couples constants avec un métal positif quelconque R et un amalgame de potassium K enfermé dans un vase poreux; ces deux corps étaient plongés dans un liquide quelconque L. La force électromotrice A_K était, en désignant par R, H la polarisation

$$A_K = K,\ L - R,\ L - R,\ H;$$

puis il remplaça dans les divers cas l'amalgame de potassium par un amalgame de zinc Zn, ce qui donne

$$A_{Zn} = Zn,\ L - R,\ L - R,\ H.$$

La différence de A_K et A_{Zn} exprime la différence des forces électromotrices du potassium et du zinc dans le même liquide L,

$$A_K - A_{Zn} = K, L - Zn, L.$$

Les résultats prouvent que cette différence est sensiblement constante et indépendante de la nature du liquide.

LIQUIDES. L	MÉTAL POSITIF R	FORCES ÉLECTROMOTRICES AVEC DES AMALGAMES de potassium. A_K	de zinc. A_{Zn}	DIFFÉRENCE. K, L—Zn, L
Sulfate de zinc...	Zinc...	29	0	29
Sulfate de cuivre.	Cuivre...	59	30	29
Chlor. de platine.	Platine...	69	40	29
Eau acidulée.....	Biox. de manganèse.	84	54	30
Eau acidulée.. ..	Bioxyde de plomb...	98	68	30

M. Wheatstone examina spécialement ensuite le couple formé par un amalgame de zinc, du sulfate de cuivre et du cuivre; il n'y avait aucune polarisation d'électrodes, et la force était

$$A = Zn, SO^4Cu - Cu, SO^4Cu = 30;$$

puis il remplaça le sulfate de cuivre par un autre sel quelconque du même métal, ce qui ne fit aucunement changer la valeur de A. Il faut donc que la différence des actions du zinc et du cuivre soit constante dans ces divers sels. En généralisant ces résultats, on a été conduit à énoncer la loi suivante : « La différence des forces électromotrices de deux métaux plongés à la fois dans un acide ou dans un sel quelconque est constante et indépendante de la nature, de l'acide ou du sel. »

M. Joule trouva ensuite par la méthode de Fechner les résultats suivants, qui sont rapportés au couple de Daniell, dont la force électromotrice est représentée par 100.

NOMS DES MÉTAUX NÉGATIFS R	LIQUIDES L.							
	POTASSE.		SULFATE DE SOUDE.		AC. SULFURIQUE ÉTENDU.		SEL ORDINAIRE.	
	A	Différ.	A	Différ.	A	Différ.	A	Différ.
Symbole des couples.......... $Pt \ldots AzO^5 \mid L \ldots R$								
Force électromotrice effective.... $A = R, L + L, AzO^5 - Pt, AzO^5$								
Amalg. de potassium..	302	68	"	"	"	"	"	"
Amalgame de zinc....	234	0	187	0	187	0	198	0
Fer..............	169	65	147	40	140	47	146	52
Cuivre..............	120	114	92	95	91	96	116	82
Argent.............	46	188	53	134	53	134	95	103
Platine.............	31	203	17	170	37	150	55	143
Symbole des couples.......... $Cu \ldots SO^4Cu \mid L \ldots R$								
Force électromotrice effective... $A' = R, L + L, SO^4Cu - Cu, SO^4Cu$								
Amalgame de zinc...	"	"	104	0	100	0	106	0
Fer..................	68	"	59	45	49	51	55	51
Cuivre..............	53	"	8	96	4	96	28	78

Les couples étudiés dans ce tableau étaient cloisonnés et se rapportaient à deux types différents. Dans le premier, le pôle positif était invariablement formé par du platine dans l'acide azotique, et le négatif était constitué par un des métaux R dans un des liquides L indiqués par le tableau. On a donc

$$A = R,\ L + L,\ AzO^5 - Pt,\ AzO^5.$$

Si, le liquide restant le même, on remplace R par du zinc, on a

$$A_1 = Zn,\ L + L,\ AzO^5 - Pt,\ AzO^5,$$

et en retranchant,

$$A_1 - A = Zn,\ L - R,\ L.$$

$A_1 - A$ est la différence entre les forces électromotrices du zinc et du métal R dans le même liquide L; cette différence est exprimée pour chaque liquide dans le tableau précédent.

Le deuxième type des couples étudiés ne diffère du précédent que par le pôle positif qui est formé par du cuivre dans le

sulfate de cuivre, et conduit de même à trouver les différences entre la force électromotrice du zinc et de l'un des métaux étudiés; elles sont inscrites dans la deuxième partie du tableau : elles sont égales à celles qu'on trouve dans la première partie, ce qui justifie le principe; mais on remarquera aussi que pour deux métaux donnés, le zinc et le platine, par exemple, les valeurs de $A_1 - A$ changent avec la nature de la dissolution : elles sont plus grandes dans la potasse que dans le sulfate de soude, dans le sulfate de soude que dans l'acide sulfurique, et dans l'acide sulfurique que dans le sel marin. Par conséquent la loi qui résultait des expériences de Wheatstone n'est point rigoureusement exacte, mais on peut la considérer comme étant à peu près vraie pour les trois derniers liquides.

M. J. Regnauld s'est placé dans des circonstances exactement définies et très-simples, il a examiné des couples analogues à celui de Daniell, dans lequel il remplaçait le cuivre par un métal quelconque; le zinc et ce métal plongeaient tous deux ou dans leur sulfate, ou dans leur chlorure, ou dans leur azotate; dans les divers cas, on peut considérer comme insensible l'action réciproque des deux liquides, et la force électromotrice observée comme la différence de celles qui sont développées par les deux métaux dans les deux sels; on trouva qu'elle est sensiblement constante.

(*Zinc. — Cadmium.*)

Zinc pur......	SO^4Zn	SO^4Cd....	Cadmium.	55
Zinc pur......	$ChZn$	$ChCd$.....	Cadmium.	42
Zinc pur......	$BrZn$	$BrCd$.....	Cadmium.	42
Zinc pur......	IZn	ICd......	Cadmium.	45
Zinc pur......	AzO^5ZnO	AzO^5CdO.	Cadmium.	42
Zinc amalgamé.	SO^4Zn	SO^4Cd....	Cadmium.	58
Zinc amalgamé.	SO^4HO	SO^4Cd....	Cadmium.	59

(*Zinc. — Cobalt.*)

Zinc pur......	$ChZn$	$ChCo$....	Cobalt.	114
Zinc pur......	AzO^5ZnO	AzO^5CoO.	Cobalt.	94

(*Zinc. — Nickel.*)

Zinc pur......	SO^4Zn	SO^4Ni......	Nickel.	127
Zinc pur	ChZn	ChNi......	Nickel.	109
Zinc pur......	AzO^5ZnO	AzO^5NiO...	Nickel.	131

(*Zinc. — Cuivre.*

Zinc pur......	SO^4Zn	SO^4Cu.....	Cuivre.	175
Zinc pur......	AzO^6Zn	AzO^6Cu....	Cuivre.	160
Zinc pur......	ChZn	ChCu......	Cuivre.	175
Zinc amalgamé.	SO^4HO	SO^4Cu.....	Cuivre.	179

Mais si on étudie attentivement le troisième tableau de M. Ed. Becquerel, on voit que la différence des forces électromotrices d'un métal et du platine dans un même liquide est loin d'être indépendante de ce liquide. Elle est faible dans l'eau, très-grande dans l'eau chlorée, et dans le cas du persulfure ou du cyanure de potassium, elle varie très-inégalement pour les divers métaux. La loi qui nous occupe est donc loin d'être générale.

SOIXANTE-NEUVIÈME LEÇON.

DE LA CHALEUR ET DE LA LUMIÈRE PRODUITES PAR LA PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

Actions calorifiques. — I. Cas des batteries électriques. — Thermomètre de Riess. — Lois des températures dans un fil. — Loi des quantités de chaleur. — II. Cas des piles. — Lois de Joule. — Conséquences de ces lois. — Expériences de M. Favre. — Relation entre les chaleurs dégagées et les forces électromotrices. — Travail produit par les courants.
Température du circuit. — Températures des soudures d'un circuit.
Lumière électrique : — Arc voltaïque. — Phénomènes calorifiques, — lumineux, — de transport. — Origine de l'arc voltaïque.
Intensité de l'étincelle électrique.

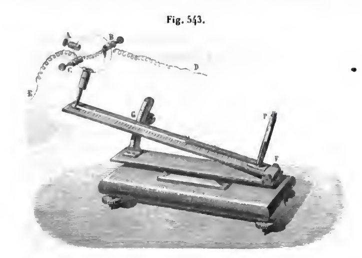
Nous mesurerons d'abord la chaleur développée dans les conducteurs, soit par la décharge instantanée d'une batterie électrique, soit par l'action des courants continus.

I. **CAS DES BATTERIES ÉLECTRIQUES.** — M. Riess a étudié cette question au moyen d'un thermomètre à air qui est représenté *fig.* 543. Il se compose d'un ballon ABC communiquant avec une tige de verre graduée MNP, dans laquelle est une colonne d'un liquide coloré ; son support peut se mouvoir autour d'une charnière F et se fixer par une vis G, ce qui permet d'incliner plus ou mois la tige ; le ballon porte deux tubulures opposées B et C que l'on peut fermer par des bouchons métalliques rodés et entre lesquels on dispose un fil de platine BC enroulé en spirale, terminé aux deux poupées B et C, et à travers lequel on fait passer la décharge.

Cette décharge échauffe le fil et le porte de t à T. Comme elle est pour ainsi dire instantanée, le fil se refroidit aussitôt qu'elle a passé et se met en équilibre de température avec l'air du ballon qui s'échauffe de t à t'.

Cet air, à son tour, finit par céder sa chaleur au ballon; mais comme ce dernier effet est très-lent, on admet qu'il est

Fig. 543.



négligeable dans les premiers moments. Alors si on désigne par p, p_1, k, k_1, les poids et les chaleurs spécifiques du fil et de l'air, on a

$$pk(\mathrm{T} - t') = p_1 k_1 (t' - t),$$

équation qui permettra de calculer $\mathrm{T} - t'$ quand on connaîtra l'échauffement du ballon ou $(t' - t)$; et comme $t' - t$ est généralement très-petit, $\mathrm{T} - t'$ sera sensiblement égal à l'élévation de température $\mathrm{T} - t = \theta$ que le fil a éprouvée par l'effet de la décharge.

D'autre part, l'échauffement de l'air amène le niveau du liquide de M en N, et il est clair que, toutes choses égales d'ailleurs, $t' - t$ est proportionnel à MN; on peut donc écrire

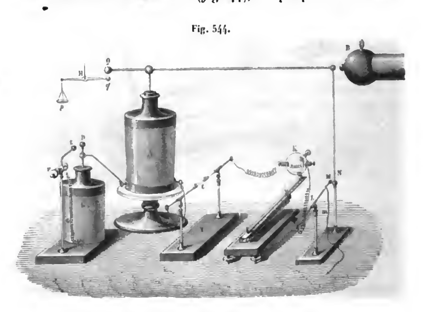
$$\mathrm{T} - t' = \theta = \frac{p_1 k_1}{pk} \alpha (\mathrm{MN}).$$

α est un facteur qu'il est facile de calculer et qui dépend de la sensibilité du thermomètre, de l'inclinaison qu'on lui donne, et enfin de la pression et de la température initiales. Mais quand ces causes de variation restent les mêmes, on voit qu'il

n'est pas nécessaire de calculer x et qu'on peut prendre $\frac{MN}{pk}$ pour la mesure de l'échauffement θ d'un fil quelconque en fonction d'une unité arbitraire, mais constante.

Il faut maintenant mesurer la quantité d'électricité qui est accumulée sur la batterie A (*fig* 544), et qui produit l'éléva-

Fig. 544.



tion de température θ en s'écoulant dans le fil. A cet effet, on isole la batterie, on met son armature extérieure en communication avec l'intérieur d'une bouteille électrométrique de Lane C, qui est posée sur un sol conducteur et dont les deux armatures aboutissent aux boutons égaux E et D; ceux-ci peuvent être placés à une distance convenue et invariable au moyen d'une vis micrométrique F.

Pendant qu'on charge la batterie A, elle envoie de l'électricité positive dans la bouteille C; il arrive un moment où une étincelle se produit en ED par la recomposition de deux quantités égales de fluides contraires que M. Riess prend comme égales à l'unité; puis la charge continuant de se faire, une série d'étincelles se succèdent, et si e est leur nombre total, la quantité

d'électricité positive qu'a reçue la bouteille C est également exprimée par e en fonction de l'unité adoptée.

Mais la bouteille C a reçu précisément autant d'électricité positive qu'il s'est condensé de fluide négatif sur l'armature externe de la batterie A; donc e représente la charge négative de cette batterie, et aussi sa charge positive, puisque toutes deux sont proportionnelles.

La quantité totale e de fluide accumulée sur l'armature intérieure de la batterie s'étale sur sa surface s en une couche uniforme dont l'épaisseur ou la tension A doit être égale à $\frac{e}{s}$, c'est ce que M. Riess a montré directement au moyen d'un électromètre à poids H, formé par un fléau de balance isolé, chargé d'un poids p et maintenu sous le conducteur Q. Au moment où la tension A atteint une certaine limite sur le conducteur Q et sur l'extrémité q du bras de levier, la force répulsive qui se produit entre eux devient égale au poids p, et fait baisser le fléau; et comme elle est égale au produit des tensions ou à A^2, on a

$$A^2 = p \quad \text{ou} \quad A = \sqrt{p}.$$

Or on trouve que la tension ainsi mesurée est proportionnelle à $\frac{e}{s}$ comme on l'avait prévu.

On voit donc, 1° comment on pourra mesurer la charge e et la tension $A = \frac{e}{s}$ de la batterie; 2° comment on déterminera l'élévation de température θ que la décharge de cette batterie déterminera dans le fil d'un thermomètre électrique. Voici comment les expériences étaient disposées (*fig.* 544).

L'extérieur de la batterie A communique, d'une part, à la bouteille électrométrique C destinée, à la fois, à mesurer la charge et à répandre dans le sol l'électricité positive repoussée par A; d'autre part, avec une série d'appareils isolés, qui sont : 1° un excitateur universel I dans lequel on pourra intercaler telle résistance i qu'on voudra; 2° le thermomètre électrique K; 3° un déchargeur composé d'une tige métallique LM qu'on fait tomber, en la tirant par un cordon de soie m, sur le conducteur N qui communique avec la machine électrique B et avec

l'armature intérieure de la batterie. Grâce à cette disposition, on charge peu à peu cette batterie, on compte le nombre e des étincelles qui se produisent en ED, ensuite on fait agir le levier MN, la décharge a lieu, on mesure le mouvement du thermomètre et l'on peut calculer θ.

Disons maintenant comment θ varie quand on change la charge et les diverses circonstances des expériences.

LOIS DES TEMPÉRATURES. — 1°. La série des conducteurs que doit traverser la décharge étant quelconque, mais invariable, et le fil de platine du thermomètre étant lui-même quelconque mais fixe, on mesure son échauffement θ, d'abord quand on fait varier la charge e d'une même batterie, ensuite quand on donne la même charge e à diverses batteries dont la surface s est différente. M. Riess a trouvé que θ est proportionnel à e^2 et en raison inverse de s,

$$\theta = a\frac{e^2}{s}.$$

2°. a est un coefficient qui dépend à la fois de la résistance du circuit total et de celle du fil K : laissons la première constante et faisons varier le fil. A cet effet, M. Riess prenait deux fils de platine, plaçait l'un en K, l'autre en i et mesurait l'échauffement θ du premier; puis il les changeait de place, ce qui ne faisait pas varier le circuit total, et il déterminait θ' pour le second fil, après avoir rendu à la même batterie la même charge que précédemment. Il trouva que θ et θ' sont indépendants de la longueur et en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre d des fils échauffés. D'où il suit que a est égal à $\frac{b}{d^4}$ et que l'on a

$$\theta = \frac{b}{d^4}\frac{e^2}{s}.$$

3°. M. Riess ayant toujours placé dans son thermomètre des fils de platine, on ne sait pas si b change, toutes choses égales d'ailleurs, avec la conductibilité du métal.

4°. Mais b dépend du circuit total qui joint les deux armatures. Mesurons θ et calculons b quand la résistance de ce cir-

cuit est quelconque et égale à R, puis ajoutons extérieurement en i entre les branches de l'excitateur, un fil dont la longueur, le diamètre et la conductibilité soient λ, δ et c, sa résistance est $\frac{4\lambda}{\pi\delta^2 c}$ et celle du circuit devient R' :

$$R' = R + \frac{4\lambda}{\pi\delta^2 c} = R\left(1 + \frac{4}{\pi c R}\frac{\lambda}{\delta^2}\right) = R\left(1 + \frac{p\lambda}{\delta^2}\right);$$

elle a augmenté dans le rapport de $1 + \frac{p\lambda}{\delta^2}$ à 1. D'un autre côté b s'est changé en b', et l'expérience prouve que l'on a

$$\frac{b'}{b} = \frac{1}{1 + \frac{p\lambda}{\delta^2}} = \frac{R}{R'}.$$

Par conséquent, le coefficient b est en raison inverse de la résistance totale du circuit ou égal à $\frac{m}{R}$, et l'on peut écrire

$$(1) \qquad \theta = \frac{m}{R d^4}\frac{e^2}{s},$$

ou bien, en remplaçant $\frac{e}{s}$ par la tension A,

$$(2) \qquad \theta = \frac{m}{R d^4} A e.$$

Lois des quantités de chaleur. — On peut maintenant calculer la quantité de chaleur w développée dans le fil du thermomètre; elle est égale au produit du poids $\frac{\pi}{4} d^2 l \rho$ de ce fil par sa chaleur spécifique k et par son élévation de température θ :

$$w = \frac{\pi}{4} d^2 l \rho k \frac{m}{R d^4}\frac{e^2}{s} = \frac{\pi}{4}\rho k m \frac{1}{R}\frac{l}{d^2}\frac{e^2}{s}.$$

En remarquant que $\frac{l}{d^2}$ est proportionnel à la résistance r du fil considéré, et en réunissant tous les coefficients numériques en un seul égal à K,

$$(3) \qquad w = K\frac{r}{R}\frac{e^2}{s}, \qquad w = K\frac{r}{R} A e.$$

Le coefficient K ne pourrait varier qu'avec la nature des diverses substances employées; mais si tous les conducteurs qui composent le circuit sont formés d'un même métal, on aura pour chacun d'eux les quantités de chaleur w_1, w_2, w_3, . . .,

$$w_1 = K\frac{r_1}{R}\frac{e^2}{s},\quad w_2 = K\frac{r_2}{R}\frac{e^2}{s},\quad w_3 = K\frac{r_3}{R}\frac{e^2}{s},\ldots,$$

et la somme de ces quantités ou la chaleur totale développée dans le circuit sera

$$W = \frac{K}{R}(r_1 + r_2 + r_3 + \ldots)\frac{e^2}{s} = K\frac{e^2}{s} = K\Lambda e.$$

Elle sera indépendante de la résistance du circuit et ne variera qu'avec la charge et la surface de la batterie. Il est probable que cette loi est générale, qu'elle s'applique à toutes les espèces de conducteurs et par conséquent que K est constant pour tous les corps; mais cette induction n'est pas démontrée par les expériences de M. Riess.

II. **CAS DES PILES.** — C'est à M. Joule que l'on doit les premières expériences destinées à mesurer la chaleur développée dans les conducteurs quand ils sont traversés par des courants continus. Il faisait passer ces courants, d'abord à travers une boussole des tangentes, ensuite dans une spirale enroulée autour d'un tube de verre et dont la résistance r était connue. L'intensité i était déterminée par la boussole; nous supposerons, comme nous l'avons toujours fait, qu'elle est exprimée par le poids d'hydrogène qui serait dégagé en une minute, et que ce poids mesure aussi la quantité d'électricité qui circule pendant ce même temps. La spirale était plongée dans un calorimètre rempli d'un poids connu d'eau, et l'élévation de température finale qu'elle lui communiquait permettait de calculer la chaleur wt développée par le courant pendant le temps t de l'expérience.

LOIS DE JOULE. — 1°. La résistance r de la spirale demeurant invariable, M. Joule a d'abord fait changer l'intensité, soit en changeant la force des couples, soit en introduisant des résistances additionnelles, et il a trouvé que w est proportionnelle

au carré de i,

$$w = \alpha i^2,$$

α ne dépend ni de la pile ni du circuit total, il ne varie qu'avec la résistance r de la spirale dont on va maintenant déterminer l'influence.

2°. M. Joule intercala dans un même circuit plusieurs spirales successives qui plongeaient chacune dans un calorimètre distinct. Leurs résistances étaient r' r'' r''', ... ; l'expérience conduite comme précédemment permit de mesurer les quantités de chaleur w' w'' w''', .., et l'on trouva qu'elles satisfaisaient à la formule précédente avec des valeurs différentes du coefficient α. Ces valeurs furent proportionnelles aux résistances et égales à $\mathrm{K}r'$, $\mathrm{K}r''$, $\mathrm{K}r'''$.

$$w' = \mathrm{K}r'i^2, \quad w'' = \mathrm{K}r''i^2, \quad w''' = \mathrm{K}r'''i^2, \ldots,$$

et en faisant la somme

$$w' + w'' + w''' = \mathrm{K}(r' + r'' + r''' + \ldots)\, i^2.$$

Donc, en général, la chaleur w développée dans une portion quelconque ou dans la totalité du circuit extérieur est proportionnelle à sa résistance r et s'exprime par

$$w = \mathrm{K}ri^2. \tag{1}$$

3°. Il fallait chercher ensuite si la chaleur qui est développée dans les piles suit la même loi que dans les conducteurs interpolaires. A cet effet, M. Joule s'occupa d'abord d'un seul couple; il mesura sa résistance spécifique r_1 et calcula la chaleur $w_1 = \mathrm{K}r_1i^2$ qu'il devrait produire en une minute d'après la loi précédente; puis il mesura par un calorimètre celle qui était engendrée en réalité, dans l'intérieur de ce couple, pendant la production du courant; il la trouva égale à w'_1 et toujours plus grande que w_1.

Il crut pouvoir expliquer cette différence en remarquant, avec M. Faraday, qu'il y a dans le couple deux causes de production de chaleur, l'une qui provient de l'oxydation du zinc aux dépens de l'eau, l'autre qui est due à la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique, et en supposant que la première est la seule dont il faille tenir compte, la seconde n'étant qu'un phéno-

mène accessoire absolument sans relation avec le courant. Il admit donc gratuitement et dans le seul but de généraliser la formule (1) que la chaleur totale w'_1, qui se dégage dans le couple se compose de deux parties, l'une qu'il nomme *la chaleur voltaïque correcte*, et qui est exprimée conformément à la loi par $Kr_1 i^2$, l'autre provenant de la dissolution de l'oxyde de zinc dans l'acide sulfurique. En représentant celle-ci par hi, car elle est proportionnelle à la quantité de zinc dissous et par suite à l'intensité i, on devrait avoir

$$w'_1 = Kr_1 i^2 + hi.$$

Des expériences très-nombreuses avaient paru justifier cette interprétation; mais de nouvelles recherches de M. Favre tendent à faire croire qu'elle n'était pas nécessaire et que le fait qu'elle avait pour but d'expliquer est inexact. w_1 est égal à w'_1; il n'y a pas lieu de distinguer deux espèces de chaleur, l'une correcte, l'autre inefficace, et la chaleur totale dégagée dans le couple suit la même loi que dans les conducteurs solides. Nous poserons donc

$$w_1 = w'_1 \quad \text{et} \quad w_1 = Kr_1 i^2.$$

Il est évident que si la formule est vraie pour un couple, elle s'applique aussi à tous les éléments d'une pile quelconque.

4°. M. Joule voulut enfin savoir si la loi qui régit la chaleur dans les conducteurs métalliques se réalise dans les liquides quand ils sont électrolysés. Il fit passer le courant par des électrodes de cuivre à travers un voltamètre qui contenait de l'eau acidulée dont la résistance était r; il trouva que la formule $w = Ari^2$ était sensiblement justifiée. Mais ayant voulu étudier le même phénomène avec des électrodes de platine, il reconnut que la chaleur réellement produite est toujours moindre que celle que l'on calcule par la formule Kri^2.

Il essaya d'expliquer cette anomalie par des considérations qu'il est inutile de rapporter depuis que M. Ed. Becquerel a levé la difficulté par des expériences décisives. Après avoir vérifié la loi de Joule sur les métaux, M. Ed. Becquerel reconnut qu'elle s'applique exactement quand on électrolyse du sulfate de cuivre avec des électrodes de cuivre, parce que si, d'une part, il y a dissolution du métal, et par suite absorption de

chaleur au pôle positif, il se fait de l'autre un dépôt d'une égale quantité de cuivre et un dégagement d'une même quantité de chaleur au pôle négatif. Tout se passe donc comme s'il n'y avait point de décomposition, et la loi $w = \mathrm{K}ri^2$ s'applique à ce liquide comme à un solide.

Les choses sont tout autres quand le voltamètre étudié contient de l'eau et des électrodes de platine. Alors les gaz en se dégageant absorbent toute la chaleur qu'ils produisent quand ils se combinent; elle est proportionnelle à leur quantité, c'est-à-dire à l'intensité i et à un facteur constant E. Par conséquent, la chaleur trouvée dans le voltamètre doit être égale à $\mathrm{K}ri^2$, diminuée de $\mathrm{E}i$, c'est-à-dire de celle que les gaz absorbent en se dégageant. L'expérience a confirmé numériquement cette explication; on peut donc dire que la loi de Joule s'applique aux conducteurs solides et liquides, pourvu qu'on tienne compte des chaleurs absorbées par l'électrolysation.

Il est probable qu'une correction analogue est nécessaire pour les couples dans lesquels il y a des dégagements de gaz, mais aucune expérience n'a encore été tentée sur ce point.

Nous allons maintenant tirer quelques conséquences de la loi de Joule. On peut d'abord la mettre sous une autre forme.

Désignons par r la résistance extérieure, par r_1 celle de la pile qui engendre le courant, et enfin par $\mathrm{R} = r + r_1$ la résistance totale. Les chaleurs développées pendant un temps t seront :

1°. Dans le conducteur... $wt = \mathrm{K}ri^2t$,

2°. Dans la pile......... $w_1t = \mathrm{K}r_1i^2t$,

3°. Dans le circuit total... $\mathrm{W}t = \mathrm{K}(r + r_1)i^2t = \mathrm{KR}i^2t$.

it exprime la quantité d'électricité qui circule pendant le temps t; elle est mesurée par le poids d'hydrogène dégagé ou par le poids du zinc dissous divisé par 33 [illegible] désignons-la généralement par e; d'un autre côté, i est ég[illegible] $\frac{[illegible]}{\mathrm{R}}$, ou au quotient de la force électromotrice par la résistance totale. En rempla-

çant it par e et i par $\frac{A}{R}$, on obtient

1°. $$wt = K \frac{r}{R} A e,$$

2°. $$w_1 t = K \frac{r_1}{R} A e,$$

3°. $$W t = K A e.$$

Conséquences. — Ces formules sont exactement celles que M. Riess a trouvées pour le cas des batteries électriques. Seulement A représentait la tension de l'électricité statique, et maintenant il exprime la force électromotrice; mais on sait, d'après Ohm, que cette tension et cette force sont identiques.

II. La quantité de chaleur développée, soit dans une portion quelconque du circuit, soit dans les couples, soit dans le circuit total, est toujours proportionnelle, 1° à la force électromotrice A de la pile; 2° à e, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui a été mise en circulation, laquelle se mesure par le nombre d'équivalents qui ont été mis en liberté par électrolysation, soit dans chaque couple, soit dans chaque voltamètre extérieur.

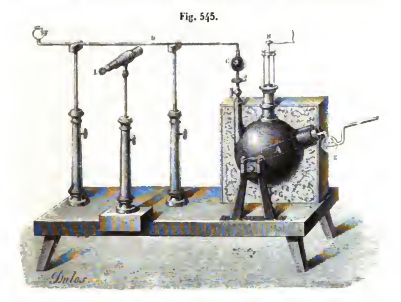
III. La quantité de chaleur qui est développée dans le circuit total $Wt = KAe$, ne dépend que de A et de e; elle ne varie pas avec la résistance et reste la même que cette résistance soit nulle ou infinie.

IV. Mais les formules précédentes montrent que cette chaleur totale KAe se partage entre le circuit extérieur et la pile proportionnellement à leurs résistances r et r_1, de sorte qu'elle est tout entière dans la pile si ce circuit est nul, et tout entière dans la résistance externe si elle est infinie.

Expériences de M. Favre. — Les deux derniers énoncés ont été vérifiés avec autant d'exactitude que de succès par M. Favre, au moyen du calorimètre qui a été décrit tome II, page 405. Cet appareil (*fig.* 545) n'est rien qu'un thermomètre dont le réservoir en fonte est très-gros, et dont la tige CD, qui est en verre, est très fine, de façon qu'il est très-sensible. Toutes les fois qu'on cède au mercure qu'il contient une quantité de chaleur égale à une calorie, le sommet D s'avance dans la tige d'un

nombre de divisions qui a été déterminé par des expériences

Fig. 545.



préliminaires; et inversement, on peut conclure du mouvement de la colonne mercurielle la quantité de calories que l'appareil a gagnées.

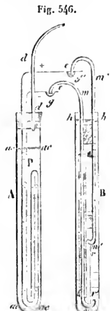
Deux moufles en fer A pénètrent dans le réservoir. On introduit dans l'un un tube de verre A (*fig.* 546), qui contient un couple voltaïque P formé de zinc amalgamé et de cuivre platiné. La chaleur développée dans ce couple est cédée à l'appareil, qui la mesure: c'est $w_1 t$. En même temps, on recueille par un tube de verre *d* la quantité d'hydrogène dégagée : son poids *it* exprime la quantité *e* d'électricité produite.

On place dans le second moufle un tube B semblable au premier, et dans lequel est tendu un fil de platine très-fin *rr'*, qui est parcouru par le courant du couple et dont la résistance *r* diminue ou augmente suivant que son diamètre est plus ou moins grand. La chaleur *wt* dégagée dans ce fil *rr'* est également cédée au calorimètre qui peut aussi la mesurer.

On fait trois déterminations successives : 1° on place le deuxième tube B dans le calorimètre et le premier A à l'extérieur : alors on détermine *wt*; 2° on introduit le couple P dans

l'appareil en laissant la résistance r au dehors : dans ce cas c'est $w_1 t$ que l'on mesure; enfin 3° on plonge à la fois le couple P et la résistance r dans les deux moufles, ce qui détermine Wt ou $wt + w_1 t$. Voici les résultats qui ont été trouvés en employant successivement des résistances r croissantes, lorsque le poids d'hydrogène dégagé était égal à 1 gramme, et la quantité e d'électricité égale à une unité.

Fig. 546.



	wt	$w_1 t$	Wt
Sans résistance.	0	18137	18137
1re résistance...	6557	11690	18247
2e résistance...	7746	10439	18185
3e résistance...	9685	8381	18066

On voit donc, conformément aux prévisions de la théorie, 1° que Wt est constant et indépendant de la résistance R; 2° que wt augmente avec la résistance r du conducteur; 3° que wt et $w_1 t$ sont complémentaires.

Pendant que 1 gramme d'hydrogène se dégageait du couple P par le tube d, 33 grammes ou 1 équivalent de zinc se dissolvaient dans l'acide sulfurique étendu. Or MM. Favre et Silbermann avaient primitivement mesuré la chaleur que dégage cet équivalent de zinc quand on le fait dissoudre directement dans cet acide, et ils avaient trouvé 18444, nombre sensiblement égal à Wt. D'où il résulte que cette quantité totale de chaleur qui se dissémine dans toutes les parties du circuit, proportionnellement à la résistance de chacune d'elles, n'est rien autre que celle qui est produite par la quantité de zinc qui se dissout dans l'acide sulfurique, laquelle se transporte en partie dans le conducteur, et se dégage en partie dans le couple.

RELATION ENTRE LES CHALEURS DÉGAGÉES ET LES FORCES ÉLECTROMOTRICES. — La loi de Joule conduit à une dernière conséquence bien autrement importante, et qui paraît destinée à jeter un jour tout nouveau sur la production des courants.

Considérons deux couples quelconques dont les forces électromotrices soient A et A', appelons Wt et $W't'$ les quantités totales de chaleur produites par ces couples quand ils ont dégagé une unité d'électricité, c'est-à-dire quand 1 équivalent de zinc a été dissous dans chacun d'eux; on a, en faisant $e = 1$,

$$Wt = KA, \quad W't' = KA',$$

$$\frac{Wt}{W't'} = \frac{A}{A'}.$$

Ce qui veut dire que les forces électromotrices sont proportionnelles aux quantités de chaleur dégagées par la dissolution de 1 équivalent de zinc dans les deux couples. Cette conséquence a été développée par M. J. Regnauld, comme il suit.

Dans un couple de Wollaston, quand 1 équivalent de zinc amalgamé se dissout, il dégage 53258 calories; mais le dégagement de l'hydrogène réduit ce nombre à 18796.

L'action est tout autre dans le couple de Daniell. Le même nombre de calories est dégagé par la dissolution du zinc, mais la réduction de 1 équivalent de cuivre qui se fait au pôle négatif absorbe 29605 calories. La différence ou la chaleur réelle développée est 23653 calories.

Enfin, dans le couple de Grove, il faut retrancher de la chaleur de sulfatation du zinc celle qui est absorbée par la réduction de l'acide azotique; elle serait 6885 calories si cet acide passait à l'état de AzO^4 et 13634 calories s'il devenait de l'acide azoteux AzO^3. La chaleur réelle se trouverait dans ces deux cas égale à 46373 calories ou à 39624 calories.

Les trois couples considérés dégagent donc des quantités de chaleur différentes qui croissent du premier au dernier aussi bien que leurs forces électromotrices. De plus, en prenant les rapports on trouve que celui des forces électromotrices est sensiblement égal à celui des quantités de chaleur, comme la formule de Joule l'indique.

Les déterminations effectuées jusqu'à présent ne sont pas assez nombreuses pour que l'on puisse considérer la loi comme démontrée; mais toutes les conséquences qu'on en tire sont justifiées. Je citerai la suivante d'après M. Favre.

On a remarqué depuis longtemps qu'un seul élément de

Wollaston ou de Daniell ne peut décomposer l'eau, tandis qu'un couple de Grove suffit pour le faire. Cela est évident : en effet, il faut 34462 calories pour décomposer 1 équivalent d'eau; par conséquent, il faut que la chaleur envoyée par la pile dans le conducteur, c'est-à-dire wt, soit au moins égale à cette quantité, et qu'ensuite il reste dans le couple une autre quantité de chaleur $w_1 t$. Il est donc nécessaire que la chaleur totale $Wt = wt + w_1 t$ dégagée par la dissolution de 1 équivalent de zinc dans le couple soit supérieure à 34462 calories. Or cette condition n'est réalisée ni dans l'élément de Wollaston, ni dans celui de Daniell; mais elle l'est dans un couple de Grove : c'est donc le seul qui puisse décomposer l'eau.

TRAVAIL PRODUIT PAR LES COURANTS. — Toutes les formules précédentes supposent que le courant ne produit aucune autre action que l'échauffement des conducteurs; mais s'il arrivait qu'il traversât un moteur électrique et produisît du travail, il faudrait évidemment que le circuit perdît une partie de sa chaleur. C'est en effet ce qui résulte des travaux de Joule et des expériences de M. Favre. Ce dernier, en attelant une pile de cinq couples à un moteur électrique plongé dans un calorimètre, trouva que la quantité totale de chaleur était KAe quand ce moteur ne fonctionnait pas et qu'elle diminuait pour devenir égale à $KAe - C$ quand il effectuait un travail égal à T. Or en divisant T par C, M. Favre obtint 444 kilogrammètres. C'est l'équivalent mécanique de la chaleur dans le cas où l'intermédiaire de la transformation est l'électricité.

En résumé, quand un équivalent de zinc a été dissous dans chaque élément d'une pile, une quantité constante d'électricité, qui est égale à l'unité, a été mise en circulation, et en même temps un nombre constant de calories a été produit, qui constitue pour ainsi dire la provision de chaleur que la pile peut dépenser ; cette chaleur est égale à KnA, si n est le nombre des éléments et A la force de chacun d'eux. Elle ne se dégage pas seulement dans les couples, mais elle se distribue dans toutes les parties du circuit, proportionnellement à la résistance de chacune d'elles. Si un électrolyte exige pour sa décomposition un certain nombre de calories a, il le prend à la chaleur totale KnA ; et si le courant effectue un travail, celui-ci absorbe son

équivalent de chaleur. Tout cela montre entre l'électricité, la chaleur, les actions chimiques et le travail mécanique, une connexité étroite et des relations d'équivalence manifestes : il n'est pas douteux qu'on ne parvienne un jour à établir la dépendance de ces phénomènes au moyen d'une théorie qui les embrassera tous à la fois.

Température du circuit. — Si on considère une portion quelconque du circuit dont la résistance soit r, elle recevra pendant l'unité de temps une quantité de chaleur égale à w; sa température s'élèvera de θ, et θ deviendra constant quand la chaleur perdue par rayonnement sera égale à w. Or cette chaleur perdue sera proportionnelle : 1° à la surface extérieure du fil ou à πdl; 2° à son excès de température θ si l'on admet la loi de Newton; 3° à un coefficient α qui représente le pouvoir émissif et qui ne variera que fort peu pour les diverses valeurs que peut prendre θ. On aura donc

$$w = \mathrm{K} r i^2 = \pi d l \alpha \theta,$$

et comme la résistance r est égale à $\dfrac{l}{\frac{1}{4}\pi d^2 c}$, et que l'intensité i est égale au quotient de la force électromotrice A par la résistance totale R, on a

$$\mathrm{K}\frac{4l}{\pi d^2 c}\frac{\mathrm{A}^2}{\mathrm{R}^2} = \pi d l \alpha \theta,$$

d'où

$$\theta = \mathrm{M}\frac{1}{\alpha}\frac{1}{d^3}\frac{1}{c}\frac{\mathrm{A}^2}{\mathrm{R}^2}. \tag{3}$$

On tire de cette formule les conséquences suivantes :

1°. Si le circuit extérieur est formé par une série de fils de mêmes diamètres et de conductibilités différentes, placés bout à bout, les valeurs de θ correspondant à chaque fil seront en raison inverse de sa conductibilité c. Si, par exemple, on fait passer le courant dans une chaîne de fils de platine et d'argent de diamètres égaux, les mailles de platine s'échaufferont plus que celles d'argent, les premières pourront rougir et les dernières rester obscures. C'est une expérience qui a été faite par Children.

2°. θ est en raison inverse de d^3. Conséquemment, si une chaîne semblable à la précédente est interposée dans le circuit, et si elle est composée de fils de platine alternativement gros et fins, ceux-ci deviendront rouges et ceux-là resteront obscurs.

3°. Lorsqu'on placera successivement dans le circuit d'abord des fils de platine, et ensuite des fils d'argent de même diamètre et de même longueur, R sera plus grand, mais c sera plus petit pour le platine. Il pourra arriver que R^2c soit plus grand, et par suite que le platine s'échauffe moins que l'argent : c'est le contraire de ce qui arrive quand les deux fils sont à la fois placés dans le même circuit, à la suite l'un de l'autre.

4°. La formule (3) montre que θ est indépendant de la longueur du fil considéré ; mais cette indépendance n'est qu'apparente, car plus ce fil sera long, plus la résistance totale R sera grande, et moins l'échauffement sera considérable, ce qui est conforme à l'observation.

5°. θ est en raison inverse du carré de la résistance totale R, et par là θ dépend de la pile que l'on emploie. Si on augmente la dimension des couples sans changer leur nombre, la résistance R diminuera sans que la force électromotrice A change, et les effets calorifiques seront plus intenses. C'est ce qui a été constaté par tous les observateurs.

6°. Enfin puisque θ est inversement proportionnel au pouvoir émissif α, toutes les circonstances qui favorisent le refroidissement diminuent la température du fil : cela explique une expérience curieuse de M. Grove. Après avoir fait rougir dans l'air un fil de platine, avec le courant d'une pile, il le plongea dans de l'hydrogène, et il le vit redevenir obscur : c'est qu'en effet l'hydrogène est de tous les gaz celui dont le pouvoir refroidissant est le plus grand.

7°. Les phénomènes ne sont cependant pas aussi simples que nous venons de le dire en faisant cette discussion. On sait en effet que la conductibilité des métaux diminue quand leur température augmente. Conséquemment, le premier effet du courant est d'échauffer le fil ; mais la réaction de cet échauffement fait diminuer c, qui devient $c(1 - m\theta)$, et augmenter la résistance R qui devient R′, parce que chacune des parties qui

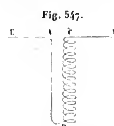
la compose s'échauffe; l'équation (3) devient donc

$$\theta = M \frac{1}{\alpha} \frac{1}{d^3} \frac{1}{c} \frac{A^2}{R'^2} \frac{1}{(1 - m\theta)}.$$

Ce qui ne permet de calculer la température finale que si l'on connaît la nouvelle valeur de la résistance totale, laquelle dépend de l'échauffement inégal éprouvé par chacun des conducteurs.

8°. Ce changement produit par la température dans la conductibilité c des fils et dans la résistance R du circuit total explique une fort singulière expérience que l'on doit à Davy. Prenons un fil de platine homogène, composé d'une portion verticale ABC (*fig.* 547) et de deux parties très-courtes CD et AE, puis faisons-le traverser par un courant d'une intensité suffisante pour l'échauffer tout entier jusqu'au rouge sombre. Plongeons ensuite la partie ABC dans de la glace, elle se refroidira jusqu'à zéro, mais AE et CD se réchaufferont jusqu'au rouge blanc. Cela tient à ce qu'en refroidissant ABC on diminue sa résistance partielle et par suite celle du circuit total R; alors θ augmente dans toutes les autres parties du courant. L'inverse a lieu, et CD et AE se refroidissent, si on échauffe la spirale par une lampe à alcool.

Fig. 547.



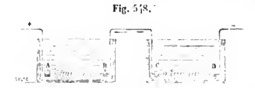
9°. La formule $W = Kri^2$ nous montre que la quantité de chaleur W développée par un courant d'intensité constante i, dans un fil quelconque, pendant l'unité de temps, augmentera avec la température de ce fil, puisque r croîtra : cette conséquence a été justifiée par les expériences de MM. Romney Robinson et Grove.

Le premier fit passer un courant d'intensité i à travers un fil de platine qui était contenu dans un tube plein d'air au milieu d'un calorimètre. Ce fil s'échauffa jusqu'à 1500 degrés Fahrenheit, et développa en un temps donné 5,5 calories. La résistance totale du circuit était alors égale à 257,6. Ensuite on plongea le fil sans intermédiaire dans l'eau du calorimètre, il ne s'échauffa que très-peu et l'on vit augmenter l'intensité du courant, parce que la résistance R avait diminué; elle n'était

plus que de 89. Mais on ajouta au circuit un fil additionnel qui ramena l'intensité et la résistance R à leur valeur primitive, et l'on mesura la chaleur produite dans le fil r : elle était réduite à 2,97 calories.

M. Grove scella deux fils de platine identiques dans deux tubes de verre qu'il remplit, l'un d'oxygène, l'autre d'hydrogène, et qu'il plongea dans deux calorimètres identiques (*fig.* 548), puis il fit passer un courant dans les deux fils à la fois.

Fig. 548.

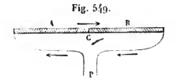


Ainsi que nous l'avons expliqué, le premier AB s'échauffa dans l'oxygène plus que le second CD dans l'hydrogène, et comme sa résistance devint plus grande, il échauffa l'eau davantage.

TEMPÉRATURES AUX SOUDURES D'UN CIRCUIT. — Outre les échauffements que le passage d'un courant détermine dans toute l'étendue d'un conducteur homogène, il y a des variations de température secondaires aux points de suture des conducteurs différents, quand ils sont placés à la suite les uns des autres. Ces phénomènes ont été découverts par Peltier.

On sait qu'en échauffant la soudure C d'une règle composée d'antimoine A et de bismuth B (*fig* 549), et en fermant le circuit par un conducteur P, on obtient un courant qui traverse la soudure du bismuth à l'antimoine et parcourt le circuit dans un sens contraire aux flèches.

Fig. 549.



Supposons maintenant que tout le circuit étant à la température ambiante, on y fasse passer au moyen d'un couple P un courant inverse du précédent et dirigé suivant les flèches de la figure, il réchauffera la soudure C.

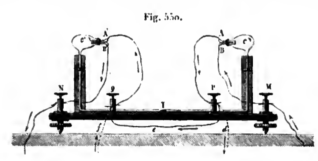
Inversement, en refroidissant la soudure C, on déterminera un courant $\underset{\longrightarrow}{ACB}$, et en faisant passer un courant opposé $\underset{\longleftarrow}{ACB}$

dans cette soudure, elle se refroidira, pourvu toutefois que ce courant soit faible.

En général, quels que soient les deux métaux A et B, les variations de température d'une soudure C produisent un courant *direct*, et elles sont reproduites par un courant *inverse;* elles sont causes du courant direct dans le premier cas, et effets du courant inverse dans le second. Cette loi est due à M. Frankenheim.

Pour démontrer ces actions particulières, Peltier employa d'abord un thermomètre de Leslie (*fig.* 550). Il introduisait

Fig. 550.



dans les deux boules C, C′ deux couples de bismuth et d'antimoine BA, A′B′ disposés inversement dans un circuit à travers lequel il faisait passer un courant de M en N; ce courant allait du bismuth B à l'antimoine A dans la première boule C qu'il refroidissait, et de l'antimoine A′ au bismuth B′ dans la seconde C′ qu'il échauffait. Les deux actions s'ajoutaient pour faire marcher l'index *i*. On peut diriger le courant dans un seul des deux couples : si c'est le second A′B′, il s'échauffe toujours; si c'est le premier AB, il se refroidit quand le courant est très-faible et finit par s'échauffer, mais toujours moins que A′B′ quand le courant qui le traverse prend une intensité progressivement croissante.

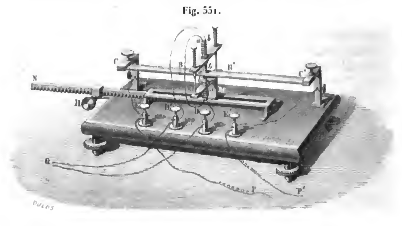
Peltier confirma ces conclusions par l'appareil suivant (*fig.* 551). CC′ est une règle horizontale composée de trois parties, deux extrêmes CB et B′C′ en cuivre, l'autre moyenne BB′ en bismuth. On fait passer un courant dans la direction

$$\mathrm{PE}\,\overrightarrow{\mathrm{CBB'C'}}\,\mathrm{E'P'}.$$

Il est inverse dans la soudure B et il doit la réchauffer; il est direct dans B′ et il doit refroidir ce point.

On constate ces changements de température au moyen d'un thermomètre spécial que Peltier a nommé la *pince thermo-électrique;* elle est portée sur un curseur M qui glisse dans

Fig. 551.



une coulisse et qu'on fait avancer ou reculer par une crémaillère N au moyen d'un pignon H; elle est constituée par deux éléments thermo-électriques, l'un inférieur *a′b′* qui presse sur la règle CC′ en la soulevant, et l'autre *aa*, *bb* placé au-dessus de cette même règle sur laquelle il est toujours appliqué en face de *a′b′* par des ressorts à boudin. Supposons que les deux mâchoires s'appuient sur une section de la règle qui soit échauffée, elles s'échaufferont aussi; un courant se produira dans l'élément supérieur, il passera de GD′ à *bb*, traversera la soudure *ba* et reviendra de *a* en *b′* dans le couple inférieur. De *b′* à *a′* il se formera un autre courant qui s'ajoutera au premier, et tous deux reviendront de *a′* en D et en G. Si donc il y a en G un galvanomètre, il se déviera par l'effet de ces deux courants dont le sens est DGD′. C'est ce qu'on trouve quand la pince est placée sur la soudure B. Mais quand elle presse la soudure B′, on observe une déviation contraire qui prouve que B′ est refroidi si le courant qui traverse CC′ est faible; quand ce courant augmente peu à peu d'intensité, la déviation devient nulle et change de sens, ce qui montre que la soudure

finit par s'échauffer; mais on reconnaît qu'elle est toujours moins chaude que B.

Pour se débarrasser du réchauffement que le courant produit dans toutes les sections du conducteur CC', M. Lenz a employé de gros prismes de bismuth et d'antimoine ; il creusait dans la soudure une cavité assez grande pour contenir le réservoir d'un thermomètre sensible, et qu'il achevait de remplir avec de la limaille : la température baissait de 4 degrés avec un courant direct dont l'intensité était convenablement réglée. Quand on versait dans la cavité de l'eau à zéro, elle se congelait, et la glace formée prenait la température de —4 degrés.

On a cherché suivant quelles lois varie la température des soudures. MM. Frankenheim d'une part, et de Quintus Icilius de l'autre, sont arrivés par des procédés différents aux mêmes résultats : nous donnerons une idée de la méthode employée par M. de Quintus Icilius. Il faisait communiquer une pile thermo-électrique de 30 éléments avec un galvanomètre et, par l'intermédiaire d'un commutateur, avec un couple faible. Il dirigeait le courant de ce couple dans la pile thermo-électrique de l'antimoine au bismuth à travers toutes les soudures paires, et du bismuth à l'antimoine dans les soudures impaires ; les premières s'échauffaient, les secondes se refroidissaient, et l'équilibre étant atteint, il faisait fonctionner le commutateur qui supprimait le courant et laissait la pile thermo-électrique en communication avec le galvanomètre. Au premier moment ce galvanomètre éprouvait une déviation proportionnelle à la différence de température des soudures de rang pair et impair; il la mesura, en prenant des précautions que je me dispense d'indiquer.

Il reconnut ainsi que la différence des températures des soudures est proportionnelle à l'intensité i du courant qui a traversé la pile, tandis que la chaleur développée dans la masse d'un conducteur homogène est, comme on le sait, proportionnelle à i^2. Il résulte de là que si cette intensité augmente, la température s'élève plus dans les parties homogènes du circuit qu'elle ne diminue aux soudures refroidies, et que celles-ci finissent par s'échauffer tout en restant moins chaudes que la masse : cela est conforme à l'observation.

LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

ARC VOLTAIQUE. — Les rhéophores opposés d'une pile ayant en général peu de tension, ne donnent point d'étincelles quand on les rapproche; mais ils en produisent toujours une, à la vérité très-petite, quand, après les avoir réunis, on vient à les séparer. Si alors on les maintient à une petite distance et que l'énergie de la pile soit considérable, l'étincelle se transforme en une lumière continue que l'on nomme *l'arc voltaïque* et qui se montre avec un grand éclat entre deux électrodes de charbon.

Ayant disposé une pile de 2000 éléments qui avait une surface totale de 824000 centimètres carrés, Davy fit communiquer les deux pôles avec deux tiges de charbon de 3 centimètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre, séparées par une distance de $0^{mm},5$; il vit alors une lumière éblouissante et continue jaillir sans bruit au point de séparation et se continuer indéfiniment. Il écarta progressivement les charbons l'un de l'autre jusqu'a 10 à 11 centimètres, et la même lumière s'allongea dans l'intervalle en prenant la forme d'un arc convexe vers le haut, conservant un éclat comparable à celui du soleil et développant une chaleur intense qui faisait rougir les charbons jusqu'au milieu de leur longueur.

LONGUEUR DE L'ARC. — L'arc voltaïque ne commence à se produire que si les charbons sont amenés presque au contact; mais une fois qu'il est allumé, on peut les écarter jusqu'à une distance maximum après laquelle il s'éteint.

Cette distance est plus grande dans le vide que dans l'air. Elle atteignit 18 centimètres au lieu de 11 avec la pile de Davy dans un œuf électrique où la pression était réduite à 6 millimètres. Elle augmente avec l'étendue des couples employés, mais surtout avec leur nombre, c'est-à-dire avec la tension des pôles : dans les expériences de M. Despretz, elle était égale à 162 millimètres avec 600 éléments de Bunsen, disposés en une seule série linéaire, et à 112 millimètres seulement quand ils formaient 24 piles distinctes et parallèles, de 25 couples chaque, réunies par leurs pôles de même nom.

L'arc se produit entre deux métaux quelconques, avec un

éclat et une longueur d'autant plus grands que ces métaux sont moins tenaces et plus faciles à volatiliser; il se développe également entre une tige de charbon et un métal, par exemple l'argent, et dans ce cas, suivant MM. Fizeau et Foucault, les conditions changent avec le sens du courant. Si celui-ci marche de l'argent au charbon, il produit aisément une lumière continue et un transport abondant de l'argent vers le charbon; s'il change de direction, il passe moins aisément, l'arc s'éteint et ne se rallume que difficilement. M. Despretz cite cette autre particularité singulière, qu'entre deux charbons verticaux la longueur limite est plus grande quand le pôle positif est en haut que lorsqu'il est en bas : la différence peut varier de 74 à 56 millimètres.

Phénomènes calorifiques. — La chaleur de l'arc est une des plus intenses que l'on puisse produire : le platine y fond comme la cire dans une bougie. M. Despretz a montré que les corps les plus réfractaires peuvent s'y liquéfier et même s'y volatiliser: que les cônes de charbon se ramollissent, se courbent, se soudent et se réduisent en vapeur, et qu'après l'action, ils sont devenus mous et traçants. D'après M. Jacquelain, le diamant se comporte comme tous les charbons, c'est-à-dire qu'il perd sa transparence et ses propriétés précieuses pour passer à l'état de graphite.

Les deux pôles ne prennent pas la même température: le positif s'échauffe plus que le négatif. Il suffit pour le démontrer de placer, comme le fit M. Gassiot, deux rhéophores de cuivre en croix : le positif rougit et le négatif reste obscur; ou bien, comme M. Tyrtow, de faire arriver le courant sur un bain de mercure par une pointe métallique : elle rougit; mais elle reste sombre et le mercure se volatilise quand on change la direction du courant. Enfin si les deux rhéophores, au lieu d'être identiques, sont formés de deux substances inégalement conductrices, c'est celle qui l'est le plus qui s'échauffe en général le moins, d'après M. Matteucci.

Phénomènes de transport. — Quand l'arc se produit dans l'air, les deux tiges de charbon diminuent de volume, parce qu'elles brûlent toutes deux; mais dans le vide cette com-

bustion ne se fait pas et l'on voit la pointe positive se creuser et diminuer de poids pendant que la négative augmente de volume et s'allonge : il y a donc un transport de matière du pôle positif vers le pôle négatif.

Ce transport se remarque quelle que soit la substance qui termine les deux rhéophores; c'est probablement parce qu'il est plus aisé avec les métaux peu tenaces, que l'arc se forme mieux entre eux, et c'est aussi pour cette raison que cet arc est plus beau quand le courant va de l'argent au charbon que s'il marche du charbon à l'argent.

Les expériences de M. Van Breda ont montré ce phénomène sous son véritable jour. Ayant établi l'arc entre deux métaux différents, il a vu que tous les deux sont entraînés à la fois, le positif dans la direction du courant, le négatif dans le sens opposé et quelquefois en quantités égales. M. Matteucci a confirmé l'exactitude de ces faits, bien que l'entraînement lui ait toujours paru plus abondant dans le sens du courant, ce qu'il attribue avec raison à la plus haute température du pôle positif. Il y a donc, en général, un double transport des substances à travers l'arc; cela doit avoir lieu même quand les rhéophores sont identiques et, dans ce cas, l'expérience n'accuse que la différence entre les quantités de matière entraînées dans les deux sens.

Ces conclusions sont confirmées par des études toutes différentes, que nous allons indiquer et que nous compléterons en optique. Quand on examine le spectre de l'arc voltaïque, on le trouve composé des mêmes couleurs que celui des rayons solaires, qui s'étalent d'une manière continue, mais au milieu desquelles se détachent avec un éclat très-vif des raies brillantes, dont le nombre et la disposition varient avec la nature des pointes des rhéophores. Or si ces pointes sont constituées par deux métaux différents, les raies observées sont formées par la superposition de celles qui caractérisent chacun de ces métaux : donc ils sont tous les deux volatilisés et entraînés dans l'espace que l'arc illumine.

CONSTITUTION DE L'ARC. — Nous pouvons maintenant donner une théorie plausible de l'arc voltaïque. Les pointes étant d'abord très-rapprochées, le courant franchit l'intervalle résistant

qui les sépare et y entraîne tout d'abord des molécules matérielles. Alors elles constituent une chaîne mobile de particules conductrices, qui transmet le courant comme le ferait une substance continue; mais à cause de la résistance que cette chaîne oppose, elle s'échauffe suivant les lois de Joule, jusqu'à émettre une vive lumière. Une fois qu'elle est constituée, elle augmente la conductibilité de l'intervalle qui sépare les pointes; alors on peut les écarter progressivement sans que le courant cesse de passer, d'entraîner avec lui des particules matérielles et de les échauffer jusqu'à les rendre lumineuses. Mais si l'on dépasse une certaine distance, le transport s'arrête et tout s'éteint. Dans ce cas, on ne peut rétablir le courant qu'en rétablissant la chaîne des particules entraînées. Cela peut se faire en rapprochant les pointes, ou bien, comme l'a vu Daniell, en faisant jaillir entre elles l'étincelle d'une machine électrique, qui fait recommencer le double transport de la matière des électrodes.

Cette théorie est justifiée par les expériences suivantes que l'on doit à M. Matteucci :

1°. Si on place en deux points de l'arc, l'un situé près de la pointe positive, l'autre voisin du rhéophore négatif, les deux extrémités d'un circuit formé par un galvanomètre prolongé par deux fils de platine, on obtient dans ce circuit un courant dérivé d'autant plus fort que ses extrémités sont plus éloignées l'une de l'autre. Les choses se passent donc absolument comme si l'arc était un conducteur liquide.

2°. On intercale dans le circuit extérieur d'une pile énergique deux pointes entre lesquelles se développe l'arc voltaïque et un voltamètre qui mesure l'intensité du courant par la quantité des gaz dégagés dans un temps constant. Ces quantités furent égales à 57, 44, 38 centimètres cubes, lorsque la longueur de l'arc était 2, 3, 4 millimètres. De là il faut conclure que l'arc oppose une résistance assez faible comparativement à celle du circuit total, puisqu'en doublant sa longueur on affaiblit peu l'intensité.

3°. Pour apprécier comment varie cette résistance avec la nature des métaux entraînés, M. Matteucci mesura les quantités de gaz dégagées dans le voltamètre quand l'arc était produit entre ces métaux, d'abord en contact, ensuite écartés de 3 millimètres. Voici les résultats :

Pointes en contact		46^{cc}
Pointes en	Cuivre	23
	Laiton	26
	Fer	27
	Charbon	29
	Étain	45

On voit que la diminution d'intensité, et par conséquent la résistance de l'arc, est variable avec la nature des métaux, et qu'elle est presque nulle avec l'étain. L'arc se conduit donc comme un conducteur, et l'on pourrait mesurer son coefficient de conductibilité comme on le fait pour une substance quelconque. Cette recherche, qui serait très-intéressante, n'a pas été tentée. Tous les phénomènes que l'arc voltaïque nous montrera dans la suite confirmeront cette idée, qu'il n'est rien autre chose qu'un courant traversant un conducteur.

ÉCLAT DE L'ARC. — MM. Fizeau et Foucault ont comparé les éclats lumineux de l'arc et du soleil en comparant leur puissance photographique. Ils isolaient deux cônes de rayons ayant le même angle et partant, l'un d'un point du soleil, l'autre d'un point de l'arc situé vers le pôle positif qui est le plus brillant. Ces cônes contenaient des quantités de lumière proportionnelles à l'éclat des deux sources; on les concentrait au moyen de lentilles et on les faisait agir sur une plaque daguerrienne jusqu'à produire deux impressions identiques. Cela exigeait des temps différents qu'on mesurait et qui sont en raison inverse des deux pouvoirs chimiques. En admettant que les éclats lumineux soient proportionnels à ces pouvoirs, ce qui peut être considéré comme approximativement vrai, on voit que le rapport des éclats de l'arc et du soleil est inversement proportionnel aux temps nécessaires pour obtenir des images égales. Ce rapport fut trouvé égal à 0,38 avec trois séries réunies de 46 couples de Bunzen, fonctionnant depuis une heure. Il augmente très-peu avec le nombre des éléments, quand ils sont disposés en série linéaire; mais il devient beaucoup plus grand quand on agrandit la surface des couples. C'est justement le contraire de ce qui arrive quand on considère la longueur de l'arc.

INTENSITÉ LUMINEUSE DE L'ÉTINCELLE ÉLECTRIQUE. — Jusqu'à

présent nous n'avons point mesuré l'intensité de la lumière donnée par l'étincelle électrique. Sur ce sujet, nous dirons quelques mots d'un travail considérable qui a été exécuté par M. Masson.

Le photomètre qu'il a imaginé repose sur le principe suivant. Qu'on suppose un disque de carton décomposé en secteurs égaux alternativement noirs et blancs, et tournant avec une vitesse de 200 ou 250 tours par seconde, il paraîtra uniformément éclairé.

Si I est l'éclat qu'auraient les secteurs blancs, étant éclairés par une lampe constante, $\frac{I}{2}$ est celui du disque tournant, puisque sa moitié seulement renvoie de la lumière. Supposons maintenant qu'on produise une étincelle électrique en avant de ce disque, chaque secteur blanc renverra une portion I′ de la lumière qu'elle lui envoie et les secteurs noirs ne renverront rien; l'éclat des secteurs blancs sera donc pendant un temps très-court $I' + \frac{I}{2}$, et celui des secteurs noirs restera $\frac{I}{2}$; alors on les distinguera les uns des autres, à moins que le rapport de $I' + \frac{I}{2}$ à $\frac{I}{2}$ ou $1 + \frac{2I'}{I}$ ne soit tellement voisin de l'unité, que l'œil ne saisisse plus de différence.

On éloigne peu à peu l'étincelle jusqu'à ce que les secteurs cessent d'être distingués, au moment où elle éclate, et quand cela a lieu $\frac{2I'}{I} = K$ est une quantité constante pour un même œil dans les mêmes conditions; et si l'on connaît I, on a proportionnellement I′.

L'appareil était disposé avec beaucoup de soin, les expériences ont été très-nombreuses, et elles ont conduit pour l'intensité L de la lumière de l'étincelle fournie par un condensateur, à la formule

$$L = \frac{K'}{\varepsilon} \frac{d^2 s}{R},$$

ε, s étant l'épaisseur et la surface du condensateur, d la distance d'explosion de l'étincelle, et R la résistance du circuit.

M. Riess a trouvé que cette distance d est proportionnelle à

la tension électrique $\frac{e}{s}$, par conséquent

$$L = \frac{K'}{\varepsilon} \frac{1}{R} \frac{e^2}{s},$$

formule tout à fait analogue à celle qui donne la quantité de chaleur développée dans une portion du circuit, ou

$$w = K \frac{r}{R} \frac{e^2}{s}.$$

La différence est que $\frac{K'}{\varepsilon}$ remplace $K r$. Or l'expérience a prouvé que K' varie avec les métaux entre lesquels jaillit l'étincelle, ce qui tient à ce que l'espace qu'elle franchit renferme des particules métalliques arrachées aux métaux, et que sa conductibilité varie avec leur nature. Le coefficient K' change donc avec cette conductibilité elle-même, et si on admet qu'il est proportionnel à la résistance r, les deux formules se confondent et peuvent être considérées comme démontrant l'identité des lois de la chaleur et de la lumière, produites par des condensateurs également épais.

SOIXANTE-DIXIÈME LEÇON.

ACTIONS MÉCANIQUES RÉCIPROQUES DES COURANTS.

Appareil général. — Action des courants parallèles, — des courants angulaires, — des courants quelconques, — des courants sinueux. — Changement du signe de la force avec le sens du courant.

Loi élémentaire. — Établissement hypothétique de la formule. — Détermination des constantes n et k.

Propriétés d'un courant rectiligne indéfini. — Action d'un courant indéfini sur un courant rectiligne fini. — Composante parallèle. — Composante perpendiculaire. — Courants croisés. — Courants perpendiculaires. — Courants parallèles. — Direction d'un courant fermé autour d'un axe vertical, — autour d'un axe horizontal. — Courants astatiques. — Rotation d'un courant horizontal.

Action de la terre. — Elle se réduit à celle d'un courant rectiligne indéfini.

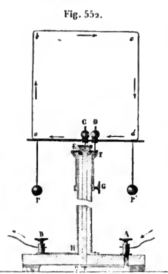
L'expérience d'OErsted ayant fait voir qu'un courant agit mécaniquement sur l'aiguille aimantée révélait entre l'électricité et le magnétisme une relation qu'on n'avait point jusque-là soupçonnée, et qui parut à Ampère être assez intime pour lui faire soupçonner que les causes de ces deux genres de phénomènes, jusqu'alors considérées comme indépendantes, pourraient bien être les mêmes; mais pour que cette intuition fût légitime, il fallait de toute nécessité que deux courants quelconques exerçassent des actions mécaniques réciproques, et Ampère fut conduit ainsi à rechercher si en réalité ces actions existent. L'expérience confirma les vues de cet illustre physicien; il détermina les lois des attractions et des répulsions de deux éléments de courant, et il parvint ensuite à composer des conducteurs de forme telle, qu'étant traversés par un courant, ils possèdent toutes les propriétés des aimants dont ils expliquent rationnellement la constitution. C'est ainsi qu'Ampère interpréta le magnétisme par l'électricité, dans une théorie qui est une des plus fécondes de la physique. Nous suivrons

dans l'exposition de ces phénomènes la méthode analytique qui a guidé l'inventeur; nous commencerons par étudier dans leurs détails les actions mécaniques de deux courants, et nous arriverons ensuite et comme conséquence à la théorie des aimants.

Pour constater ces actions mécaniques, il fallait faire agir un courant fixe sur un autre courant mobile. Ampère avait imaginé dans ce but des appareils généraux qui ont été souvent modifiés depuis. Ceux que nous emploierons ont été disposés par M. Obellianne, conservateur du cabinet de l'École Polytechnique. Décrivons d'abord le support des courants mobiles (*fig.* 552).

Sur une base en bois sont fixées deux poupées A et B. La première reçoit le courant et l'amène par une colonne métallique OE dans un godet en fer E, qui contient du mercure. Tout autour de cette colonne, et séparée d'elle par un tube de verre, est une enveloppe métallique H, qui est en communication avec la poupée B, et le long de laquelle glisse une deuxième enveloppe de cuivre GF qui se fixe à la hauteur qu'on veut par une vis G et qui se termine au sommet F par une coupe annulaire en fer pleine de mercure. On voit que le godet E et la coupe F sont toujours en communication avec les deux pôles de la pile, et que si on les réunit par des conducteurs de forme quelconque, ceux-ci fermeront le circuit et seront traversés par le courant de E en F. Il ne nous reste plus qu'à nous occuper de ces conducteurs.

Fig. 552.



Leur forme est très-variable suivant les cas; mais ils sont toujours supportés par une tige de bois *ad* équilibrée par des contre-poids P et P'. Une de leurs extrémités est formée par une

aiguille d'acier C, par laquelle ils s'appuient dans le godet E, l'autre par une deuxième aiguille semblable D qui plonge dans le mercure de F, mais sans toucher le fond de la coupe. Dès lors, tout le système est mobile autour de l'axe vertical passant par C et peut se tenir en équilibre dans tous les azimuts possibles.

Si ce conducteur mobile *abcd* est un rectangle ou un cercle, on reconnaîtra d'abord qu'il s'oriente de lui-même sous l'action de la terre. Il se place de telle sorte, que son plan soit perpendiculaire au méridien magnétique, et que le courant traverse la branche *da* de l'est à l'ouest. Cette action sera étudiée dans la suite; mais comme elle est toujours très-faible, nous pouvons la négliger; elle ne masquera pas les attractions ou les répulsions beaucoup plus énergiques qui seront exercées sur *abcd* par des conducteurs fixes que nous placerons dans le voisinage et dont nous allons nous occuper.

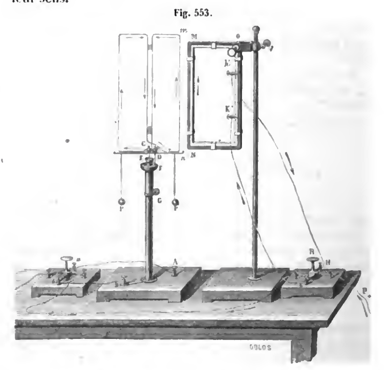
La forme et la position de ces conducteurs sont variables, suivant les expériences que l'on a en vue; le plus souvent (*fig.* 553) ils sont constitués par un fil de cuivre terminé aux poupées *h'* et *h'* et faisant plusieurs tours sur un rectangle OMN*k'h'*. Celui-ci est soutenu, à une hauteur qu'on fait varier à volonté, sur une colonne autour de laquelle il peut tourner pour se placer dans tous les azimuts possibles. Ses côtés MN et MQ peuvent être dirigés verticalement ou horizontalement par le jeu d'une articulation O.

Pour la facilité des expériences, les supports des courants mobile et fixe sont reliés à deux commutateurs, comme on le voit dans la *fig.* 553. Le courant arrive par P dans le premier commutateur R qui l'envoie dans le cadre *k'*NM*h'*, suivant une direction qu'on fait changer en tournant le bouton R. Il revient ensuite en H, et de là dans le deuxième commutateur *ab* qui le dirige vers le conducteur mobile C*nm*D, dans un sens ou dans l'autre, suivant la position qu'on donne à ce commutateur; enfin il revient au pôle négatif. On voit que c'est le courant d'une même pile qui traverse les parties fixes et mobiles dans des directions qu'on est maître de changer et de fixer à volonté. 5 éléments de Bunsen suffisent pour faire toutes les expériences.

Nous allons d'abord constater l'existence des actions réci-

proques exercées par deux courants voisins, et déterminer leur sens.

Fig. 553.

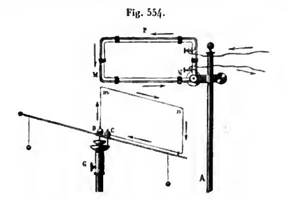


I. **COURANTS PARALLÈLES.** — L'expérience étant disposée comme nous venons de le dire (*fig.* 553), on trouve que les parties MN et *mn* se rapprochent ou s'éloignent, si le courant les traverse dans la même direction ou dans deux directions contraires. Or ces parties étant plus voisines que toutes les autres, doivent exercer entre elles une action prépondérante qui détermine le sens du mouvement. On peut dès lors dire que « deux courants parallèles s'attirent ou se repoussent, s'ils vont dans le même sens ou dans des sens contraires. »

II. **COURANTS ANGULAIRES.** — Mettons en présence deux courants rectangulaires PMN et D*mn*C (*fig.* 554), ayant deux côtés verticaux M et D*m* situés sur l'axe de rotation, et deux autres côtés horizontaux MN et *mn* placés dans un même plan

horizontal, faisant un angle quelconque, et qui, à cause de leur rapprochement, exerceront encore une action prédominante :

Fig. 554.



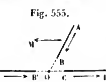
nous trouverons que « MN et *mn* s'attirent si tous deux vont en s'éloignant ou en se rapprochant du sommet de l'angle qu'ils forment, et se repoussent quand l'un s'éloigne et que l'autre s'approche de ce même sommet. » L'équilibre aura lieu quand les deux courants seront devenus parallèles en direction et de même sens.

III. **COURANTS QUELCONQUES.** — Sans rien changer aux conditions de l'expérience précédente, élevons le cadre MNP en le faisant glisser parallèlement à lui-même le long de la colonne qui le porte; les deux courants MN et *mn* ne seront plus dans le même plan; ils se trouveront dans une position quelconque, auront pour perpendiculaire commune l'axe D*m*M, et l'un d'eux *mn* sera mobile autour de cette ligne. On reconnaît dans ce cas qu'ils s'attirent ou se repoussent comme s'ils étaient dans le même plan, et que la distance M*m* fût nulle : donc « deux courants quelconques agissent comme deux courants angulaires et comme si leur perpendiculaire commune était le sommet de leur angle. »

IV. **PORTIONS D'UN MÊME COURANT RECTILIGNE.** — Quand un courant mobile AB va en s'approchant du sommet O de l'angle qu'il forme avec le courant fixe CD, et que celui-ci s'éloigne de O (*fig.* 555), AB est repoussé; il tourne autour de O, et vient se

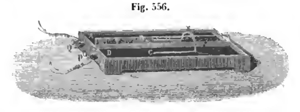
placer dans la position d'équilibre A'B', située dans le prolongement de CD; alors A'B' et CD sont deux portions d'un même courant rectiligne. On peut conclure de là que la force qui agit sur AB a une composante M parallèle à CD; il est probable que celle-ci n'est pas nulle entre les deux portions A'B' et CD d'un même courant, et qu'elle tendrait à les éloigner si elles étaient mobiles. Ampère a vérifié cette induction au moyen de l'appareil suivant (*fig.* 556).

Fig. 555.



Une auge en bois est divisée par une lame verticale de verre en deux compartiments remplis de mercure et communiquant avec les pôles d'une pile par les poupées Q et P. Un

Fig. 556.

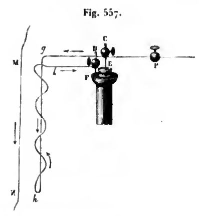


petit conducteur de cuivre BEC, verni dans toute sa longueur, à l'exception de ses extrémités B et C, nage sur le mercure des deux compartiments qu'il réunit par un arc E passant en forme de pont par-dessus la cloison : le courant suit la route ABECD. L'expérience montre que les deux portions fixes AB et CD de ce courant repoussent et font reculer le conducteur mobile qui les prolonge.

V. **COURANTS SINUEUX.** — Plaçons sur le support des courants mobiles (*fig.* 557) le conducteur C*ghk*D, qui offre une branche descendante rectiligne *gh* et une partie remontante *hk* laquelle est sinueuse, dont la figure est absolument quelconque, mais qui s'éloigne très-peu de *gh*; puis opposons à ce système un courant fixe MN: il n'y aura aucune action. D'où on conclut que le courant sinueux inverse *hk* détruit l'effet du courant rectiligne *gh*, et par conséquent « que l'on pourra toujours remplacer un courant rectiligne par un courant sinueux quel-

conque, de même sens, pourvu qu'il s'écarte très-peu du premier. »

Fig. 557.



VI. EFFET D'UN CHANGEMENT DE SENS. — Toutes les expériences montrent que si on change le sens de l'un des deux courants, on ne fait rien que changer le signe de l'action qu'ils exercent entre eux.

LOI ÉLÉMENTAIRE.

Ces expériences suffisent pour prouver que des courants voisins exercent entre eux des actions mécaniques; mais elles ne font que montrer l'effet résultant de forces complexes dont elles ne mesurent ni l'intensité, ni la direction, ni les points d'application. Il est évident que si l'on connaissait l'action élémentaire réciproque de deux éléments de courant situés d'une manière quelconque, on pourrait décomposer deux courants finis, quelles que soient leur forme et leur situation respectives, en leurs éléments, exprimer les forces qui agissent entre ceux-ci, et les composer en une résultante et un couple uniques. Nous devons donc commencer par chercher la loi de cette action élémentaire, ce que nous allons faire en nous appuyant sur les principes suivants :

1°. Deux éléments de courants AB et A'B', situés sur une même ligne droite, agissent suivant cette ligne par raison de symétrie (*fig.* 558).

2°. Deux éléments de courants AB, A'B', perpendiculaires à

la ligne qui joint leurs milieux, agissent également suivant cette ligne, par la même raison de symétrie (*fig.* 558).

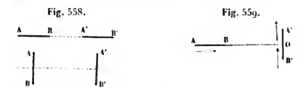


Fig. 558. Fig. 559.

3°. Il n'y a pas d'action entre deux éléments AB, A'B' situés dans un même plan, et dont l'un AB est perpendiculaire sur le milieu de l'autre (*fig.* 559).

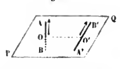
D'abord il n'y aura pas d'action suivant BO, car s'il y en avait une, et qu'elle fût attractive, elle devrait devenir répulsive si le sens de A'B' changeait. Mais ce changement de sens de A'B' n'apporte aucune variation dans sa position relativement à AB, donc la force ne peut changer, donc elle est nulle.

Examinons, en second lieu, s'il peut y avoir entre AB et A'B' une action directrice. Les deux moitiés de A'B' agissent sur AB comme deux courants angulaires, B'O est attirée, OA' est repoussée et toutes deux tendent à tourner autour de O et à se placer parallèlement à AB suivant un couple. Mais le bras de levier de ce couple étant infiniment petit, son moment est nul. En résumé, il n'y a ni force motrice, ni force directrice entre les deux éléments.

4°. Lorsque deux éléments AB et A'B' (*fig.* 560) ont une perpendiculaire commune OO', et que chacun d'eux est normal au plan passant par l'autre et par OO', leur action réciproque est nulle.

En effet, cette action ne pourra pas être dirigée suivant OO', car si l'on changeait le sens du courant A'B', le signe de l'action devrait être changé, et de répulsive elle deviendrait attractive ou inversement. Mais la seule modification apportée au courant A'B' par cette inversion serait qu'après avoir marché vers la gauche de AB, il se dirigerait ensuite vers sa droite : il faudrait donc que la droite et la gauche de AB eussent des propriétés différentes, c'est-à-dire que

Fig. 560.



ce courant fût dissymétrique autour de son axe, ce qui ne peut être. Il est donc impossible qu'il y ait une action attractive ou répulsive entre les deux éléments.

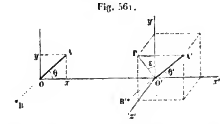
Reste à savoir s'il y a une action directrice : il y en a une en effet, car les courants considérés ont une perpendiculaire commune OO′, et les deux moitiés de A′B′ tendent à tourner autour de cette ligne pour se placer parallèlement à AB. Mais le bras de levier étant infiniment petit, le moment du couple est nul.

5°. Un courant $\underset{\rightarrow}{O'A'}$ (*fig.* 561) peut se remplacer par ses projections sur trois axes rectangulaires.

En effet, on peut substituer à $\underset{\rightarrow}{O'A'}$ le courant sinueux très-voisin O′z′PA′, allant de O′ à A′. Ce dernier se compose de trois parties, l'une O′z′, et les deux autres z′P et PA′ qui peuvent être remplacées par les projections Oy' et Ox' puisqu'elles leur sont parallèles et égales en longueur, et qu'elles n'en sont éloignées que de quantités infiniment petites. En définitive $\underset{\rightarrow}{OA'}$ se trouve remplacé par ses projections $\underset{\rightarrow}{Ox'}$, $\underset{\rightarrow}{Oy'}$, $\underset{\rightarrow}{Oz'}$.

Ces principes admis, cherchons l'action d'un élément de courant $BA = ds$ sur un autre élément $B'A' = ds'$. Soit θ l'angle

Fig. 561.



que le premier fait avec $OO'x'$; cet angle sera égal à zéro si le courant va de O en x, à 90 degrés s'il marche de O en y et à $90° + AOx$ s'il est dirigé suivant OB. Soient θ' l'angle, compté de la même manière, de O′A′ avec $O'x'$, r la distance des deux points O, O′ et ε l'angle des deux plans AOx, $A'O'x'$. Nous pourrons remplacer OA et O′A′ par leurs projections x, y ;

x', y', z', et nous aurons à considérer l'action des deux éléments x et y sur chacun des trois autres x', y', z'.

y n'aura d'effet ni sur x', ni sur z', d'après les troisième et quatrième principes; mais il attirera y' si la direction des deux courants est la même, puisque tous deux sont parallèles.

D'après le troisième principe, l'action de x sera nulle sur y' et z'; elle sera répulsive ou attractive sur x', si le sens de x et de x' est le même ou inverse, puisque x et x' sont deux portions d'un même courant rectiligne.

En définitive, il n'y aura à exprimer que l'action de y sur y', et de x sur x', c'est-à-dire

de $\quad y = ds \sin\theta \quad$ sur $\quad y' = ds' \sin\theta' \cos\varepsilon,$

et de $\quad x = ds \cos\theta \quad$ sur $\quad x' = ds' \cos\theta'.$

Si θ et θ' sont plus petits que 90 degrés, la première sera attractive et la deuxième répulsive.

Nous admettrons avec Ampère que ces deux actions sont proportionnelles aux intensités i et i' des deux courants, aux longueurs de leurs projections y, y', x, x', et à deux fonctions inconnues de leurs distances qui seront $+f(r)$ pour la première action et $-F(r)$ pour la seconde. On aura donc

$$F = ii'\,ds\,ds'[\sin\theta \sin\theta' \cos\varepsilon\, f(r) - \cos\theta \cos\theta'\, F(r)].$$

Il ne reste plus qu'à déterminer $f(r)$ et $F(r)$. Pour cela, on s'adresse à l'expérience. On imagine des systèmes de deux courants de forme et de position déterminées; on intègre la formule précédente, et on trouve une expression de la résultante, qui est fonction de $F(r)$ et de $f(r)$. D'autre part, l'expérience donne la loi de cette résultante; on identifie le résultat du calcul et celui de l'observation, et on a une équation de condition pour trouver $F(r)$ et $f(r)$. Si donc on traite la question dans deux cas particuliers, on obtient deux équations de condition qui peuvent suffire pour déterminer ces fonctions inconnues.

Ampère avait supposé tout d'abord que les deux forces attractive ou répulsive précédentes sont en raison inverse d'une certaine puissance de la distance r. Cela n'est point évident à priori. Mais Demontferrand ayant prouvé que cela est exact,

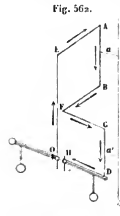
nous accepterons l'hypothèse d'Ampère, afin de simplifier les calculs, et nous remplacerons $f(r)$ par $\frac{1}{r^n}$, et $F(r)$ par $\frac{k}{r^n}$: ce qui réduira la valeur de F à

$$(1) \qquad F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^n}(\sin\theta\sin\theta'\cos\varepsilon - k\cos\theta\cos\theta').$$

Il reste à déterminer n et k.

DÉTERMINATION DES CONSTANTES. — I. On place sur le support des courants mobiles un système de deux rectangles FEAB, FCDH (*fig* 562) faisant entre eux un angle quelconque, dont les hauteurs sont différentes et les bases égales : ils prennent sous l'action de la terre une position d'équilibre fixe. Puis on dispose entre les deux branches AB et CD un courant vertical indéfini XY de sens opposé, qui les repousse toutes deux, et l'on parvient aisément à les maintenir dans leur position première en plaçant le courant indéfini à des distances convenables a et a' de chacune d'elles. On mesure ces distances, et l'on trouve qu'elles sont proportionnelles aux longueurs l et l' de AB et de CD,

Fig. 562.



$$\frac{l}{l'} = \frac{a}{a'}.$$

Appliquons maintenant le calcul à ce cas particulier. Soient (*fig.* 563) deux courants parallèles, l'un indéfini XY, l'autre fini X'Y', dont la distance A'B est a. Si nous examinons en particulier deux éléments mn et $m'n'$, nous voyons que $\theta = \theta'$ et que $\varepsilon = 0$. La formule devient

Fig. 563.

$$F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^n}(\sin^2\theta - k\cos^2\theta);$$

la distance r ou AA' est

$$r = \frac{A'B}{\sin\theta} = \frac{a}{\sin\theta}.$$

Si nous comptons s à partir de B,

$$s = AB = a\cot\theta, \qquad ds = -a\frac{d\theta}{\sin^2\theta},$$

et en remplaçant s et r,

$$F = -\frac{ii'ds'}{a^{n-1}}\sin^{n-2}\theta(\sin^2\theta - k\cos^2\theta)\,d\theta.$$

F peut se partager en deux composantes, l'une parallèle à XY qu'il est inutile de considérer, l'autre $F\sin\theta$ perpendiculaire aux deux courants, qui produira leur attraction et qui est

$$F\sin\theta = -\frac{ii'ds'}{a^{n-1}}[\sin^{n-1}\theta(\sin^2\theta - k\cos^2\theta)]\,d\theta.$$

En intégrant cette expression entre $\theta_1 = 0°$ et $\theta_2 = 180°$, on trouvera la force attractive totale φ de XY sur $m'n'$, et comme la parenthèse est indépendante de a, son intégrale sera constante et peut se représenter par $-A$: on aura

$$\varphi = A\frac{ii'ds'}{a^{n-1}},$$

et enfin, en désignant par l la longueur de X'Y', on trouve, en intégrant par rapport à s',

$$\Psi = A\,ii'\frac{l}{a^{n-1}}.$$

Si la longueur de X'Y' devenait l', et que sa distance A'B fût égale à a', on aurait

$$\Psi' = A\,ii'\frac{l'}{a'^{n-1}}.$$

Donc pour que les attractions ou les répulsions de deux courants finis l, l', sur un courant parallèle indéfini placé entre eux à des distances a et a' soient égales, il faut que l'on ait

$$\frac{l}{l'} = \frac{a^{n-1}}{a'^{n-1}}.$$

D'un autre côté, l'expérience a montré que l'on devait avoir la

relation

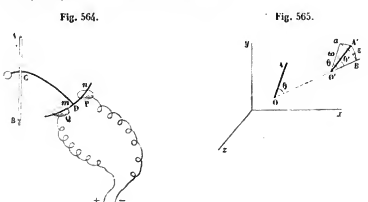
$$\frac{l}{l'} = \frac{a}{a'};$$

il faut donc que n soit égal à 2.

Dès lors la formule de la loi élémentaire devient

$$(2) \qquad F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}(\sin\theta\sin\theta'\cos\varepsilon - k\cos\theta\cos\theta').$$

II. Il nous reste à déterminer k par l'application de la même méthode à un deuxième cas d'équilibre. Nous choisirons le suivant (*fig.* 564). On fixe à un axe vertical mobile AB, par une tige isolante CD, un fil horizontal de cuivre mn, dont les extrémités affleurent sur deux globules de mercure P et Q disposés dans deux petites auges. Le courant d'une pile E arrive en Q, traverse mn et revient par P au pôle négatif. mn se trouve alors soumis à l'action d'un courant fermé EQPE, dont la forme est quelconque, et l'expérience prouve que mn ne se déplace jamais. Par conséquent, il faut que la composante tangentielle de toutes les actions exercées sur un élément mn par tous les éléments d'un circuit fermé, soit nulle. Exprimons cette condition par le calcul, et il en résultera une deuxième équation de condition qui nous permettra de calculer k. Commençons par transformer la formule (2).



Transportons parallèlement à lui-même en $O'a$ l'élément $OA = ds$ (*fig.* 565), de manière à placer son centre sur celui

du deuxième élément $O'A' = ds'$, et formons l'angle trièdre $O'BA'a$. On connaît les angles $aO'B = \theta$, $A'O'B = \theta'$, ainsi que celui des deux plans $aO'B$, $A'O'B$ qui est égal à ε; et en désignant par ω l'angle $aO'A'$, on a

$$\cos\omega = \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos\varepsilon;$$

en remplaçant $\cos\varepsilon$ par sa valeur dans l'équation (2) :

$$(3) \qquad F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}\left[\cos\omega - (k+1)\cos\theta\cos\theta'\right].$$

Rapportons les deux éléments à trois axes rectangulaires, désignons par x, y, z, les coordonnées d'une des extrémités de l'élément ds, celles de l'autre extrémité seront $x+dx$, $y+dy$, $z+dz$. Désignons de même par x', y', z', et $x'+dx', y'+dy', z'+dz'$ les coordonnées des deux extrémités du second élément. Les cosinus des angles que OA forme avec les axes, sont $\frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dz}{ds}$; ceux de la ligne OO' sont $\frac{x'-x}{r}, \frac{y'-y}{r}, \frac{z'-z}{r}$. On aura donc

$$\cos\theta = \frac{(x'-x)\,dx + (y'-y)\,dy + (z'-z)\,dz}{r\,ds};$$

or

$$r^2 = (x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2.$$

Par suite

$$-\frac{dr}{ds} = \frac{(x'-x)\,dx + (y'-y)\,dy + (z'-z)\,dz}{r\,ds};$$

donc

$$\cos\theta = -\frac{dr}{ds}.$$

On trouvera de même

$$\cos\theta' = \frac{dr}{ds'}.$$

L'angle ω ou celui des deux éléments, sera

$$\cos\omega = \frac{dx}{ds}\frac{dx'}{ds'} + \frac{dy}{ds}\frac{dy'}{ds'} + \frac{dz}{ds}\frac{dz'}{ds'},$$

et en différentiant l'expression de r^2, d'abord par rapport à s,

ensuite par rapport à s', on trouvera

$$r\frac{d^2r}{dsds'}+\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}=-\frac{dx}{ds}\frac{dx'}{ds'}-\frac{dy}{ds}\frac{dy'}{ds'}-\frac{dz}{ds}\frac{dz'}{ds'}.$$

Par conséquent,

$$\cos\omega=-r\frac{d^2r}{dsds'}-\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}.$$

En supprimant, pour abréger, le facteur $ii'ds$, et en remplaçant $\cos\theta$, $\cos\theta'$ et $\cos\omega$ par leurs valeurs,

$$F=-\frac{1}{r^2}\left(r\frac{d^2r}{dsds'}-k\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}\right)ds',$$

et comme

$$\frac{d\left(r^{-k}\frac{dr}{ds}\right)}{ds'}=r^{-k}\frac{d^2r}{dsds'}-kr^{-k-1}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}$$
$$=r^{-k-1}\left(r\frac{d^2r}{dsds'}-k\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}\right);$$

il vient

$$F=-r^{k-1}\frac{d\left(r^{-k}\frac{dr}{ds}\right)}{ds'}ds',$$

et enfin, en remplaçant $\frac{dr}{ds}$ par $-\cos\theta$,

$$F=r^{k-1}\frac{d(r^{-k}\cos\theta)}{ds'}ds'.$$

Cela posé, pour le cas d'équilibre indiqué (*fig.* 563), il faut exprimer que la composante tangentielle de l'action de chaque élément sur $mn=ds$ est nulle; elle est pour chacun d'eux $F\cos\theta$, il faut donc calculer

$$\int F\cos\theta=\int r^{k-1}\frac{d(r^{-k}\cos\theta)}{ds'}\cos\theta\,ds'$$
$$=\int r^{2k-1}r^{-k}\cos\theta\,\frac{d(r^{-k}\cos\theta)}{ds'}ds',$$

et en intégrant par parties,

$$\int F\cos\theta=\frac{\cos^2\theta}{2r}+(2k-1)\int\frac{\cos^2\theta}{r^2}\frac{dr}{ds'}ds'.$$

L'intégrale devant être prise d'une valeur de θ à la même, puisque le circuit est fermé, le premier terme sera nécessairement nul, et pour que le second le soit dans tous les cas possibles, il faut que $2k - 1$ soit nul, ou que $k = \frac{1}{2}$; la formule définitive qui exprime l'action de deux éléments de courants sera donc

$$(\alpha) \qquad F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}\left(\sin\theta\sin\theta'\cos\varepsilon - \frac{1}{2}\cos\theta\cos\theta'\right),$$

ou bien sous une autre forme

$$(\beta) \qquad F = \frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}\left(\cos\omega - \frac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right).$$

Une fois que cette expression de l'action réciproque de deux éléments est connue, celle que deux courants de forme et de position déterminées exercent l'un sur l'autre peut être trouvée par le calcul, sans autres difficultés que celles du calcul lui-même.

On exprime, en effet, l'action de deux éléments quelconques, on la décompose en trois composantes parallèles aux axes coordonnés, et en les intégrant, on obtient les trois composantes de l'action totale qui se réduit toujours à un couple et à une force uniques. Pour donner une idée des calculs que l'on a à effectuer, nous allons étudier en détail le plus simple et le plus important de tous les cas que l'on peut se proposer, celui d'un courant indéfini agissant sur un courant fini situé dans le même plan.

PROPRIÉTÉS D'UN COURANT INDÉFINI.

ACTION SUR UN COURANT FINI. — Soient XY (*fig.* 566) le courant indéfini, AB un courant fini faisant un angle ω avec le premier. Supposons que OY et AB aillent en s'éloignant du sommet O; considérons les éléments M et M', et comptons les valeurs de s et de s' à partir de O, de façon

Fig. 566.

que $OM = s$, et que $OM' = s'$: nous aurons

$$\theta' = \theta + \omega, \qquad \frac{s'}{s} = \frac{\sin\theta}{\sin(\theta+\omega)};$$

et en différentiant cette dernière expression par rapport à s',

$$ds' = s\,\frac{\sin(\theta+\omega)\cos\theta - \sin\theta\cos(\theta+\omega)}{\sin^2(\theta+\omega)}\,d\theta,$$

$$ds' = s\,\frac{\sin\omega}{\sin^2(\theta+\omega)}\,d\theta.$$

D'un autre côté, dans le triangle MOM',

$$\frac{MM'}{OM} = \frac{r}{s} = \frac{\sin\omega}{\sin(\theta+\omega)} \quad \text{ou} \quad r^2 = s^2\,\frac{\sin^2\omega}{\sin^2(\theta+\omega)}.$$

En remplaçant θ', ds' et r^2 dans l'équation (β),

$$F = \frac{ii'\,ds}{s\sin\omega}\left[\cos\omega - \frac{3}{2}\cos\theta\cos(\theta+\omega)\right]d\theta.$$

Cette force qui agit suivant MM' se décompose en deux autres, l'une $F\cos\theta$ qui est dirigée suivant AB, l'autre $F\sin\theta$ perpendiculaire à cette ligne; nous les calculerons séparément.

COMPOSANTE PARALLÈLE. — Sa valeur est,

$$F\cos\theta = \frac{ii'}{\sin\omega}\,\frac{ds}{s}\left[\cos\omega\cos\theta - \frac{3}{2}\cos^2\theta\cos(\theta+\omega)\right]d\theta.$$

$F\cos\theta$ se compose d'un coefficient constant $\frac{ii'}{\sin\omega}$ et de deux facteurs variables qui s'intègrent séparément, l'un $\frac{ds}{s}$ dépendant de s, l'autre compris dans la parenthèse, ne contenant que θ. Le premier donne

$$\int\frac{ds}{s} = l.s,$$

intégrale qui doit être prise entre les limites $s = OA$ et $s = OB$. Ce qui fait

$$l.OB - l.OA = l.\frac{OB}{OA};$$

La parenthèse qui dépend de θ peut s'écrire

$$\cos\omega\cos\theta - \frac{3}{4}(1+\cos 2\theta)\cos(\theta+\omega)$$
$$= \cos\omega\cos\theta - \frac{3}{4}\cos(\theta+\omega) - \frac{3}{4}[\cos 2\theta\cos(\theta+\omega)]$$
$$= \cos\omega\cos\theta - \frac{3}{4}\cos(\theta+\omega) - \frac{3}{8}[\cos(3\theta+\omega)+\cos(\theta-\omega)].$$

L'intégrale générale est

$$\cos\omega\sin\theta - \frac{3}{4}\sin(\theta+\omega) - \frac{1}{8}\sin(3\theta+\omega) - \frac{3}{8}\sin(\theta-\omega).$$

Elle devient pour $\theta=\theta_1=180°-\omega$, ce qui correspond à un point infiniment éloigné du côté de Y,

$$\cos\omega\sin\omega - \frac{1}{8}\sin 2\omega - \frac{3}{8}\sin 2\omega = 0.$$

Pour $\theta=\theta_2=0°$, c'est-à-dire pour le point O, on a

$$-\frac{3}{4}\sin\omega - \frac{1}{8}\sin\omega + \frac{3}{8}\sin\omega = -\frac{1}{2}\sin\omega.$$

Enfin si $\theta=\theta_3=-\omega$, ce qui a lieu pour un point infiniment éloigné du côté de X, on trouve encore une valeur nulle.

I. Si on prend l'intégrale entre $\theta_1=180°-\omega$ et $\theta_2=0$, c'est-à-dire dans l'angle BOY,

$$\varphi = \int_{\theta_2}^{\theta_1} F\cos\theta = \frac{ii'}{\sin\omega}\, l.\frac{OB}{OA}\,\frac{1}{2}\sin\omega = \frac{ii'}{2}\, l.\frac{OB}{OA}.$$

Cela veut dire que si les deux courants vont en s'éloignant tous deux du point O, il existe une force agissant suivant la ligne OB dans un sens qu'il faut déterminer. Pour cela, nous remarquerons quelle est indépendante de l'angle ω, quand les limites OB et OA demeurent les mêmes, c'est-à-dire quand le courant AB est assujetti à tourner autour du point O; or si $\omega=0$, AB est confondu avec OY, et l'expérience a prouvé (page 200) qu'il est repoussé par lui vers le point O. Donc, il sera toujours sollicité par la même force dirigée de B en A vers le sommet O, quel que soit l'angle ω. Cette force resterait la même si les deux courants changeaient de sens, c'est-à-dire

allaient tous deux en s'approchant de O; elle changerait de signe si l'un des courants marchait vers O, et que l'autre s'en éloignât.

II. En prenant l'intégrale entre $\theta_2 = 0$ et $\theta_3 = -\omega$, ou dans l'angle XOB, on trouve

$$\varphi' = \int_{\theta_2}^{\theta_3} \mathrm{F}\cos\theta = -\frac{ii'}{\sin\omega}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}\,\frac{1}{2}\sin\omega = -\frac{ii'}{2}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}.$$

Il y a donc une force φ' indépendante de ω, égale et contraire à φ, qui tend à éloigner le courant AB du point O. Par conséquent, si AB est sur le prolongement de XO, de manière à faire partie du même courant, il sera repoussé, comme l'expérience l'a prouvé.

III. Enfin si nous prenons l'intégrale entre $\theta_1 = 180° - \omega$ et $\theta_3 = -\omega$, c'est-à-dire si nous considérons l'action du courant XY indéfini dans les deux sens, l'intégrale est nulle et il n'y a point de force dirigée suivant AB.

Composante perpendiculaire. — Considérons maintenant la composante perpendiculaire à AB ou $\mathrm{F}\sin\theta$:

$$\mathrm{F}\sin\theta = \frac{ii}{\sin\omega}\,\frac{ds}{s}\left[\cos\omega\sin\theta - \frac{3}{2}\sin\theta\cos\theta\cos(\theta+\omega)\right]d\theta;$$

$\frac{ds}{s}$ s'intègre comme dans le cas précédent. La parenthèse peut s'écrire

$$\cos\omega\sin\theta - \frac{3}{4}\sin 2\theta\cos(\theta+\omega)$$
$$= \cos\omega\sin\theta - \frac{3}{8}[\sin(3\theta+\omega) + \sin(\theta-\omega)];$$

ce qui donne pour intégrale générale

$$-\cos\omega\cos\theta + \frac{1}{8}\cos(3\theta+\omega) + \frac{3}{8}\cos(\theta-\omega).$$

Pour $\theta = \theta_1 = 180° - \omega$, on a

$$+\cos^2\omega - \frac{1}{8}\cos 2\omega - \frac{3}{8}\cos 2\omega = \cos^2\omega - \frac{1}{2}\cos 2\omega$$
$$= \cos^2\omega - \frac{1}{2}(2\cos^2\omega - 1) = \frac{1}{2}.$$

Pour $\theta = \theta_2 = 0°$,

$$-\cos\omega + \frac{1}{8}\cos\omega + \frac{3}{8}\cos\omega = -\frac{1}{2}\cos\omega;$$

enfin pour $\theta = \theta_3 = -\omega$,

$$-\cos^2\omega + \frac{1}{8}\cos 2\omega + \frac{3}{8}\cos 2\omega = -\frac{1}{2}.$$

I. L'intégrale étant prise entre $\theta_1 = 180° - \omega$ et $\theta_2 = 0$, c'est-à-dire dans l'angle BOY, il vient

$$\psi = \int_{\theta_1}^{\theta_1} \mathrm{F}\sin\theta = \frac{ii'}{\sin\omega}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}\,\frac{1}{2}(1+\cos\omega) = \frac{ii'}{2}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}\cot\frac{\omega}{2}.$$

Par conséquent, quand les deux courants vont en s'éloignant du sommet O de l'angle qu'ils forment, outre la force φ qui tend à faire glisser AB dans sa direction, il en existe une autre ψ normale à AB, dont le sens n'est point déterminé par l'intégration, mais peut être fixé par l'expérience; or nous avons vu que cette force tend à diminuer l'angle BOY. Lorsque AB est assujetti à tourner en O, ψ est proportionnelle à $\cot\frac{\omega}{2}$; elle est nulle si l'angle $\omega = 180°$, elle augmente quand ω décroît, elle devient infinie quand $\omega = 0$ et que les courants sont confondus. L'équilibre aura lieu quand AB sera appliqué sur OX ou sur OY; il sera instable dans le premier cas, et stable dans le second. La même chose aurait lieu si les deux courants s'approchaient du sommet O.

II. Si l'on prend l'intégrale entre $\theta_2 = 0$ et $\theta_3 = -\omega$, c'est-à-dire dans l'angle XOB où l'un des courants s'approche et l'autre s'éloigne du sommet,

$$\begin{aligned}\psi' = \int_{\theta_3}^{\theta_2} \mathrm{F}\sin\theta &= \frac{ii'}{\sin\omega}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}\,\frac{1}{2}(1-\cos\omega)\\ &= \frac{ii'}{2}\, l.\frac{\mathrm{OB}}{\mathrm{OA}}\cot\frac{180° - \omega}{2},\end{aligned}$$

ψ' est une force qui est de même sens que ψ, qui tend à augmenter l'angle $180° - \omega$ des deux courants, et qui est encore proportionnelle à la cotangente de la moitié de cet angle. Elle est infinie et l'équilibre est instable quand $\omega = 180°$, elle

devient nulle et l'équilibre est stable si $\omega = 0$. Cela est conforme à l'expérience.

III. Enfin lorsque l'intégrale est prise entre les limites $\theta_4 = 180 - \omega$ et $\theta_3 = -\omega$, les deux valeurs des intégrales s'ajoutent, et l'on obtient

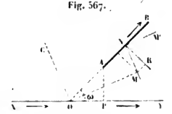
$$\psi + \psi' = R = \int_{\theta_3}^{\theta_4} F \sin\theta = \frac{ii'}{\sin\omega}\, l.\frac{OB}{OA}.$$

Les deux forces normales concourent pour appliquer OB sur OY; alors les deux courants coïncident et adhèrent avec une force qui devient infinie.

Résultante. — Puisque le courant OY fait naître sur AB deux composantes, l'une φ dirigée de B en A, l'autre ψ agissant suivant la perpendiculaire NR, et appliquée en un point déterminé N (*fig.* 567), la résultante M fera avec NA un angle α, dont la tangente sera

$$\tang\alpha = \frac{\psi}{\varphi} = \frac{\frac{ii'}{2}\, l.\frac{OB}{OA}\cot\frac{\omega}{2}}{\frac{ii'}{2}\, l.\frac{OB}{OA}} = \cot\frac{\omega}{2}.$$

Fig. 567.



La résultante M sera donc perpendiculaire à la bissectrice OM de l'angle ω, son intensité sera

$$M = \sqrt{\varphi^2 + \psi^2} = \frac{ii'}{2}\, l.\frac{OB}{OA}\sqrt{1 + \cot^2\frac{\omega}{2}} = \frac{ii'}{2}\, l\,\frac{OB}{OA}\,\frac{1}{\sin\frac{\omega}{2}};$$

de même la portion XO du courant indéfini exerce sur AB une force résultante M' perpendiculaire à la bissectrice OC de l'angle XOB, et dont l'intensité se déduit de la précédente, en

changeant ω en $180° - \omega$,

$$M' = \frac{ii'}{2} l \cdot \frac{OB}{OA} \frac{1}{\cos\frac{\omega}{2}}.$$

M et M' sont perpendiculaires entre elles; et si on considère l'action totale du courant XY indéfini dans les deux sens, elle sera dirigée suivant NR et égale à $\psi + \psi'$ ou à R :

$$R = \frac{ii'}{2} l \cdot \frac{OB}{OA} \sqrt{\frac{1}{\sin^2\frac{\omega}{2}} + \frac{1}{\cos^2\frac{\omega}{2}}} = ii' l \cdot \frac{OB}{OA} \frac{1}{\sin\omega}.$$

En désignant par h la perpendiculaire AP, et par l la longueur AB,

$$l \cdot \frac{OB}{OA} = l \cdot \left(\frac{\frac{h}{\sin\omega} + l}{\frac{h}{\sin\omega}} \right) = l \cdot \left(1 + \frac{l \sin\omega}{h}\right)$$

$$= \frac{l \sin\omega}{h} + \frac{1}{2} \frac{l^2 \sin^2\omega}{h^2} + \ldots,$$

donc

$$(7) \qquad R = ii' \left(\frac{l}{h} + \frac{1}{2} \frac{l^2 \sin\omega}{h^2} + \ldots \right).$$

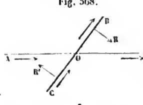
Par conséquent l'action d'un courant XY indéfini dans les deux sens, sur un courant fini AB situé dans son plan et de direction quelconque, se réduit à une force unique R perpendiculaire à AB. Elle est infinie si h est nulle, et quand l est assez petit par rapport à la distance h pour qu'on puisse se contenter du premier terme du développement, R est indépendant de l'angle ω, proportionnel à l et en raison inverse de la simple distance.

Ces formules conduisent aux conséquences suivantes :

1°. **COURANTS CROISÉS.** — Lorsqu'un courant fini CB mobile autour de O (*fig.* 568) coupe le courant indéfini XY, la partie OB éprouve de la part de XY une action représentée par une force infinie R perpendiculaire à sa direction et qui tend à diminuer l'angle BOY. Il en est de même de la partie OC, qui

est soumise à une force R′ agissant dans l'angle COX. Ces deux actions concourent pour appliquer BC sur XY, dans un sens tel que les deux courants soient confondus en direction.

Fig. 568.



Si les deux courants n'étaient pas dans le même plan et qu'ils eussent une perpendiculaire commune projetée en O, l'expérience prouve que BC est encore soumis à un couple qui tend à le placer parallèlement à XY. C'est aussi ce qui résulte du calcul.

2°. **COURANTS PERPENDICULAIRES.** — Quand le courant fini BB′ (*fig.* 569) est perpendiculaire à XY, dans le même plan que lui, situé tout entier au-dessus et s'éloignant de XY, il est sollicité par une force unique R parallèle à $\underset{\Rightarrow}{XY}$, et dont l'intensité est exprimée par la formule (γ) en y remplaçant ω par 90 degrés,

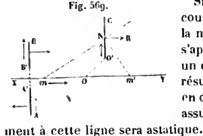
$$R = ii'\left(\frac{l}{h} + \frac{1}{2}\frac{l^2}{h^2} + \ldots\right),$$

et si BB′ a une longueur l très-petite par rapport à h,

$$R = \frac{ii'l}{h}.$$

La force est en raison inverse de la simple distance h.

Fig. 569.



Si l'on considère un deuxième courant AA′ égal à BB′, placé à la même distance au-dessous et s'approchant de XY, il éprouvera un effet égal et opposé. D'où il résulte qu'un courant AB coupé en deux parties égales par XY et assujetti à se mouvoir parallèlement à cette ligne sera astatique.

L'action de XY sur un courant vertical et fini O′C, situé dans un plan quelconque se réduit encore à une force $\underset{\Rightarrow}{NR}$ parallèle à XY (*fig.* 569) : car deux éléments m et m' pris à droite et à gauche,

et à égale distance de la perpendiculaire commune OO′, développent sur N des forces répulsive et attractive égales entre elles, agissant dans le plan Nmm', et dont la résultante NR est évidemment horizontale. D'où il suit que CO′ marchera de X vers Y s'il est au-dessus de OO′, en sens opposé s'il est au-dessous, et qu'il est astatique, si, étant assujetti à rester parallèle à lui-même, il est divisé en deux parties égales par OO′.

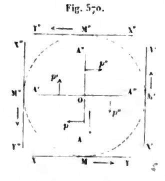
3°. **COURANTS PARALLÈLES.** — Si un courant fini X′Y′ est parallèle à XY, l'action se réduit encore à une force R qui est perpendiculaire à XY (*fig.* 563), attractive si les deux courants vont dans le même sens, et répulsive dans le cas contraire. Pour en trouver la valeur, il faut faire $\omega = 0$ dans la formule (7)

$$R = ii' \frac{l}{h}.$$

Par conséquent, cette force est proportionnelle à la longueur du courant fini, quelle que soit cette longueur, et en raison inverse de sa distance à XY.

4°. **ROTATION D'UN COURANT HORIZONTAL.** — Sous l'influence de XY (*fig.* 570), un courant $\overset{\text{OA}}{\Rightarrow}$ horizontal et mobile autour d'un axe vertical O prendra un mouvement de rotation continue. En effet, s'il est d'abord placé en OA, il sera sollicité par la force normale p qui l'amènera en OA′. Arrivé dans cette direction, il continuera d'être soumis à une force encore perpendiculaire à lui-même, et puisque OA′ et XY marchent en sens opposé, elle agira suivant p' et transportera le courant en OA″. Là il éprouvera une action dirigée suivant p'', et quand il sera en OA‴, il sera attiré par p'''. Dans ces quatre situations du courant ainsi que dans ses positions intermédiaires, la force est toujours normale au courant mobile, et son intensité est donnée par la

Fig. 570.



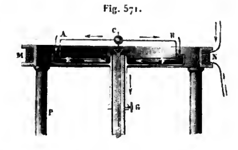
formule (7)

$$R = ii'\left(\frac{l}{h} + \frac{1}{2}\frac{l^2 \sin\omega}{h^2} + \ldots\right),$$

dans laquelle h exprime la distance OM et l la longueur OA; si h est grande et l petite, R et son moment de rotation sont indépendants de ω. Dans le cas général, l'intensité et le point d'application de R sur OA changent avec ω, et par conséquent aussi le moment de rotation; mais la force agit toujours dans le même sens pour continuer la rotation.

Le même effet serait produit si le courant XY prenait les positions X'Y', X''Y'', X'''Y''', ou bien si on le remplaçait par l'enveloppe de toutes les positions successives qu'il peut prendre, c'est-à-dire par le cercle MM'M''M'''. C'est en effet avec un courant circulaire que nous ferons l'expérience (*fig.* 571).

Fig. 571.



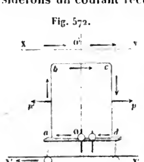
Le support du courant mobile ne diffère de celui de la *fig.* 552, que par la cuvette extérieure qui est remplacée par une large coupe de fer EF remplie de mercure. L'équipage mobile est composé de deux fils horizontaux CA, CB, recourbés verticalement en A et B, et que le courant traverse en s'éloignant ou en se rapprochant de C; enfin le conducteur fixe est un fil de cuivre faisant un nombre considérable de tours sur un cadre circulaire extérieur MN.

Il est évident que les actions exercées sur les branches verticales AE, BF se détruisent, parce qu'elles sont parallèles, de même sens et qu'elles agissent à l'extrémité de bras de levier égaux. Tout se réduit donc à l'effet du courant circulaire sur CA et CB, et l'on voit se produire le mouvement de rotation continue, dans le sens indiqué par la théorie.

On pourrait maintenant se proposer de déterminer par le calcul l'action de XY sur des courants mobiles de forme quelconque, mais ces questions deviennent beaucoup plus complexes; nous nous contenterons de traiter quelques exemples simples qui rentrent dans les cas précédents.

5°. **COURANT FERMÉ, MOBILE AUTOUR D'UN AXE VERTICAL.** — Considérons un courant rectangulaire *abcd* (*fig.* 572), mobile autour d'un axe vertical OO'; les parties *bc* et *da* étant par rapport à XY dans le cas de la *fig.* 568, seront sollicitées chacune par un couple et tendront à se placer parallèlement à XY. Si XY est très-rapproché, l'action sur *bc* l'emportera, si XY est à l'infini, les deux couples seront égaux et se détruiront.

Fig. 572.



cd et *ab* étant perpendiculaires au plan horizontal qui passe par XY (comme O'C dans la *fig.* 569), seront sollicitées par des forces horizontales opposées p, p', qui formeront un couple, lequel tendra à placer le rectangle parallèlement à XY.

Si la distance à XY est infinie, les effets de *bc* et de *ad* se détruisant, ce couple agira seul; son moment sera proportionnel aux longueurs *ab* et *cd*, et au bras de levier *bc*; il pourra se représenter par la surface du rectangle. Quand XY sera très-rapproché, il faudra ajouter au couple précédent la différence de ceux qui sont produits sur *bc* et *ad*, cette différence sera de même signe que ce couple.

La même position d'équilibre serait atteinte si XY était remplacé par un autre courant X'Y' situé en sens opposé au-dessous du rectangle. On peut donc dire que celui-ci se placera parallèlement à XY ou à X'Y', et que le sens du courant dans la branche horizontale, la plus voisine du conducteur indéfini, sera le même que dans celui-ci.

Si on fait la même expérience avec un courant fermé de forme quelconque (*fig.* 573), on pourra le décomposer en tranches par des plans parallèles et remplacer ses éléments MN, M'N' par leurs projections horizontale et verticale. Quand

XY sera à l'infini, son effet sur les parties horizontales sera

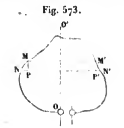


Fig. 573.

nul et se réduira sur les éléments verticaux à une infinité de couples proportionnels à la surface des rectangles tels que MNM'N', ou à un couple unique proportionnel à la surface totale du courant mobile.

6°. **CONDUCTEURS ASTATIQUES.** — Il est facile d'imaginer des conducteurs sur lesquels XY n'exerce aucune action directrice: tel est AB dans la *fig.* 569; tels sont aussi les suivants (*fig.* 574

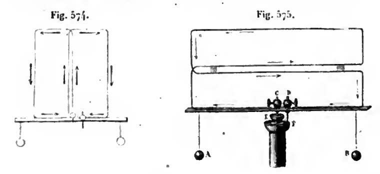
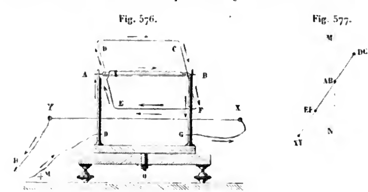


Fig. 574. Fig. 575.

et 575), qui se composent de rectangles égaux traversés en sens inverse par le même courant.

7°. **COURANT FERMÉ, MOBILE AUTOUR D'UN AXE HORIZONTAL.** — Soit un conducteur rectangulaire fermé DCFE (*fig.* 576), mobile autour de l'axe AB par lequel le courant entre et sort, et soumis à l'action d'un autre courant indéfini XY, qui est parallèle à AB. Les branches DE, CF sont sollicitées par des forces égales et contraires parallèles à XY et à l'axe AB, et qui sont sans action; mais les parties EF et DC sont soumises à deux

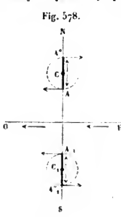
autres forces attractive et répulsive, égales entre elles si XY


Fig. 576. Fig. 577.

est à l'infini et constituant un couple qui placera le rectangle dans le plan ABXY. Cette position d'équilibre est représentée *fig.* 577, qui indique une coupe de l'appareil perpendiculairement à AB.

ACTION DE LA TERRE SUR LES COURANTS.

Reprenons l'expérience de la rotation d'un courant horizontal (*fig.* 571); mais supprimons le conducteur circulaire MN de façon que l'équipage mobile ne soit soumis à l'influence d'aucun courant voisin; nous le verrons néanmoins tourner, moins rapidement il est vrai que précédemment, mais dans un sens qui est déterminé. Si le centre C (*fig.* 578), c'est-à-dire le lieu de l'observation, est situé dans l'hémisphère boréal, la rotation se fait dans le sens des flèches A et A″; s'il est placé dans l'hémisphère austral en C_1, le mouvement a lieu dans la direction des flèches A_1, A''_1. Tout se passe comme s'il y avait dans l'équateur magnétique un courant indéfini allant de E en O, de l'est à l'ouest.


Fig. 578.

Cette conclusion se confirme par les deux expériences suivantes :

Le conducteur *abcd* (*fig.* 572), suspendu autour d'un axe vertical, se dirige dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique, et le courant marche dans *da* de l'est à l'ouest, absolument comme il le ferait si l'on avait placé au-dessous de lui un courant X'Y' allant de l'est à l'ouest.

Enfin, si l'on fait tourner l'appareil de la *fig.* 576 autour du bouton O, de manière à placer l'axe AB perpendiculaire au méridien magnétique, et si on supprime le conducteur indéfini XY, on voit le rectangle DCFE s'incliner à l'horizon, prendre une position fixe, et se diriger de telle sorte que la partie inférieure EF pointe vers le sud, et soit traversée par le courant de l'est à l'ouest. Il faut donc que le courant terrestre XY soit au sud des lieux que nous occupons dans l'hémisphère boréal. La même expérience faite dans l'hémisphère austral prouve que le courant terrestre est situé au nord de la station.

Tout ceci démontre donc que le globe terrestre agit en tous ses points comme s'il était traversé par un courant indéfini perpendiculaire au méridien magnétique et situé du côté de l'équateur.

Nous reviendrons bientôt sur cette hypothèse pour la développer, et nous montrerons que le courant terrestre n'est point rectiligne, mais qu'il circule dans l'équateur magnétique de l'est à l'ouest.

SOIXANTE ET ONZIÈME LEÇON.

DES ACTIONS MÉCANIQUES RÉCIPROQUES ENTRE LES COURANTS ET LES AIMANTS.

Solénoïdes. — 1° Un solénoïde peut remplacer un aimant dans l'expérience d'Œrsted. — 2° Il est dirigé par la terre comme un aimant. — 3° Deux solénoïdes s'attirent ou se repoussent comme deux aimants. — 4° En coupant un solénoïde en deux, on obtient deux solénoïdes opposés par des pôles contraires. — 5° Un solénoïde et un aimant s'attirent ou se repoussent comme deux aimants.

Action d'un solénoïde sur un élément de courant; — sur un courant angulaire indéfini. — Expérience de Biot et Savart. — Action d'un courant indéfini vertical ou horizontal sur une aiguille diversement suspendue.

Rotation des courants par l'action d'un aimant ou inversement. — Identité des solénoïdes et des aimants.

SOLÉNOÏDES. — Que l'on conçoive (*fig.* 579) une file de conducteurs circulaires égaux, infiniment petits, infiniment rapprochés, perpendiculaires à la ligne droite ou courbe AB qui joint leurs centres, et traversés par des courants parallèles; on aura ce qu'Ampère nomme un *solénoïde*.

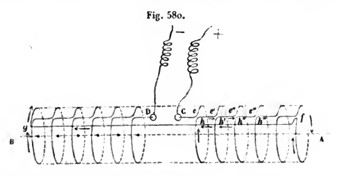
Fig. 579.



On peut trouver par le calcul les propriétés d'un pareil assemblage. A la vérité, on ne peut le réaliser pratiquement; mais il est possible de construire des appareils qui en offrent sensiblement toutes les propriétés. On peut, sur un cylindre dont l'axe est AB, disposer un conducteur de la manière suivante (*fig.* 580) : de C en *e* il est parallèle à l'axe, puis il se replie sur un cercle presque fermé jusqu'au point *h* très-voisin de *e*; ensuite il se continue suivant *he'*, parcourt un deuxième cercle parallèle au premier, et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité A.

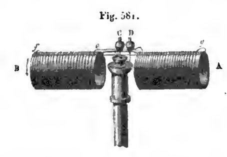
Alors il revient de f en g en une ligne droite qui détruit

Fig. 580.



l'effet de toutes les parties rectilignes Ce, ee', $e'e''$, ..., et, arrivé en g, il se replie de nouveau en une série de droites et de cercles qui le ramènent en D. Par conséquent, cet appareil se réduit à une suite de cercles perpendiculaires à l'axe AB. Mais il est facile de voir que si l'on se contente de former avec le fil conducteur une hélice passant par les points e, e', e'', les spires pourront sensiblement être remplacées par des cercles parallèles et par des droites ee', $e'e''$, ..., et que l'appareil total agira comme le précédent; enfin si les tours sont très-rapprochés et que la longueur totale du cylindre soit très-grande par rapport à son diamètre, il offrira sensiblement les propriétés du solénoïde d'Ampère. On pourra faire arriver le courant par deux poupées C et D, et

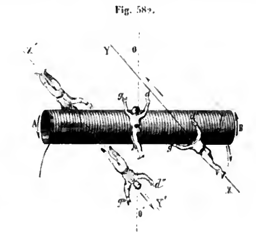
Fig. 581.



tenir le solénoïde à la main ou le suspendre sur le support des courants mobiles par deux pointes d'acier (*fig.* 581). Étudions d'abord par l'observation les propriétés de ces hélices.

1°. *Un solénoïde peut remplacer un aimant dans l'expérience d'Œrsted* (*fig.* 582). Soit XY un courant indéfini et AB

Fig. 582.



un solénoïde placé au-dessous de XY et mobile autour d'un axe vertical OO', chaque cercle qui le compose se placera dans un plan vertical parallèle à XY; par conséquent, l'axe AB se disposera perpendiculairement à cette ligne. De plus, le sens des courants sera le même dans XY et dans les parties de chaque cercle les plus rapprochées de lui, comme l'indique la figure. Si donc on transportait le courant indéfini au-dessous du solénoïde en X'Y', l'équilibre persisterait.

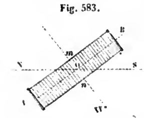
Nous savons que si l'expérience est faite avec un aimant, le pôle austral se place à la gauche du courant XY : par analogie, nous appellerons pôle austral du solénoïde l'extrémité A qui se tourne vers la gauche *g'*, et pôle boréal la partie B qui se dirige vers la droite *d'*. Pour reconnaître ces pôles sans amphibologie, figurons en *gd* dans le solénoïde la poupée imaginée par Ampère : « Si elle regarde l'axe AB, le pôle austral sera à sa gauche *g*, et le pôle boréal à sa droite *d*. »

2°. *Un solénoïde se dirige comme un aimant sous l'influence de la terre.* Nous avons en effet démontré dans la leçon précédente que la terre agit comme un courant indéfini XY, qui serait perpendiculaire au méridien magnétique et marcherait de

l'est à l'ouest; le pôle austral d'un solénoïde mobile autour d'un axe vertical se placera à la gauche de ce courant, c'est-à-dire du côté du nord, le pôle boréal à sa droite, c'est-à-dire vers le midi, et l'axe du solénoïde prendra la direction de l'aiguille de déclinaison.

Si le solénoïde est mobile autour d'un axe horizontal O, perpendiculaire au méridien magnétique (*fig.* 583), que l'est soit en arrière et l'ouest en avant du tableau, le sud sera vers la droite en S, et le nord N vers la gauche; le courant terrestre sera en XY; sa droite et sa gauche seront vers S et N, s'il regarde le point O; le solénoïde devra se placer de telle sorte que chacun des courants circulaires qui le composent soient parallèles au plan *mn*XY, et qu'ils aillent dans la partie inférieure *n* de l'est à l'ouest. Le pôle austral sera en A au-dessous de l'horizon, et le boréal en B au-dessus. L'expérience prouve en outre que l'axe AB est parallèle à l'aiguille d'inclinaison.

Fig. 583.



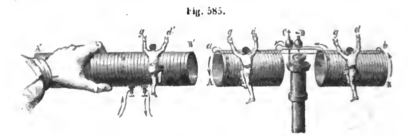
3°. *Les pôles de deux solénoïdes se repoussent ou s'attirent comme ceux de deux aimants.* Pour faire l'expérience, nous présenterons au solénoïde AB placé sur le support des courants mobiles (*fig.* 584), un autre solénoïde A'B' que nous tiendrons à la main. Si les axes des deux appareils sont confondus, et que les pôles de nom contraire B et A' soient approchés l'un de l'autre, les courants circulaires des deux solénoïdes seront parallèles et par conséquent s'attireront; si au contraire on retourne le solénoïde A'B', de manière à placer B' vis-à-vis de B, les parties antérieures des courants qui sont figurées par des lignes pleines, se placeront derrière le tableau, celles qui étaient postérieures et représentées en lignes ponctuées se mettront en avant, les cercles seront parcourus par des cou-

Fig. 584.



rants de sens opposé et se repousseront. L'expérience prouve plus encore, c'est qu'on peut donner aux axes des deux solénoïdes des positions relatives quelconques, et que toujours les pôles de nom contraire s'attirent, et ceux de même nom se repoussent (*fig.* 585).

Fig. 585.



4°. Les deux solénoïdes AB, A'B' (*fig.* 584) qui ont le même axe et sont composés de courants parallèles, peuvent être considérés d'abord comme n'en faisant qu'un seul. Si l'on vient ensuite à les séparer en deux, on développe aux deux parties B et A' des pôles opposés. On voit donc qu'*en coupant un solénoïde en deux parties, chacune d'elles devient un solénoïde unique,* absolument comme en brisant un aimant on en obtient deux.

5°. Jusqu'à présent ces propriétés pouvaient être plus ou moins prévues par les lois connues des actions des courants; en voici une autre plus inattendue : *Deux pôles, l'un d'un aimant, l'autre d'un solénoïde, s'attirent ou se repoussent comme ceux de deux aimants ou de deux solénoïdes.* C'est ce qu'on montrera aisément en présentant un aimant à l'une ou à l'autre des extrémités B ou A d'un solénoïde mobile (*fig.* 585).

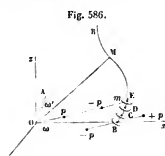
On voit donc en résumé, 1° qu'un solénoïde a deux pôles; 2° qu'il se dirige comme le fait une aiguille de déclinaison ou d'inclinaison; 3° que les pôles de même nom ou de nom contraire repoussent ou attirent ceux d'un aimant ou d'un autre solénoïde; 4° que ces pôles sont sollicités par un courant indéfini comme ceux d'une aiguille aimantée. Par conséquent, tout solénoïde se conduit dans tous les cas possibles comme s'il était un véritable aimant.

Cependant, avant de nous prononcer sur l'identité de ces

deux sortes d'appareils, il faut aller plus loin; il faut démontrer que non-seulement les actions qu'ils exercent sont de même sens, mais encore qu'elles s'expriment par les mêmes lois mathématiques. Voici la marche que nous suivrons pour le prouver. Puisque nous connaissons la loi élémentaire de la force exercée entre deux éléments, et qu'un solénoïde est un assemblage géométriquement défini de courants, nous pourrons calculer l'action totale qu'il produit sur un autre courant voisin dont la forme et la position seront connues. Ce calcul nous conduira à des lois nécessairement exactes, puisqu'elles seront des conséquences mathématiques de la formule élémentaire qui est démontrée. Cela fait, nous chercherons à vérifier ces lois par l'expérience, mais en remplaçant le solénoïde par un aimant; et s'il y a accord entre le calcul fait pour celui-là et l'expérience exécutée avec celui-ci, il faudra conclure que le solénoïde est un aimant.

ACTION D'UN SOLÉNOIDE SUR UN ÉLÉMENT DE COURANT. — Soit (*fig.* 586) un solénoïde indéfini BCDE... MR, et un élément de courant $OA = ds$, voici comment se fait le calcul dont nous ne donnerons pas les détails. On exprime l'action de l'élément OA sur un élément quelconque du cercle B; on la décompose suivant les trois axes xyz, et l'on intègre ces trois composantes pour le cercle entier. On répète le même calcul pour le cercle C, puis pour D,..., et l'on cherche la résultante générale de toutes ces forces. Or comme toutes les actions élémentaires étaient appliquées en O, la résultante passera aussi par ce point, et l'on trouve que dans tous les cas elle est représentée en intensité par

Fig. 586.



$$\varphi = \frac{\mu i \sin \omega}{r^2} ds,$$

μ étant une constante qui dépend du solénoïde, c'est-à-dire de la distance et de la grandeur des cercles qui le composent, r la

distance de l'élément OA à l'extrémité B, et ω l'angle que forme OB avec le courant OA. De plus, cette force est perpendiculaire au plan AOB, et si l'observateur qui personnifie le courant regarde B, elle agit de manière à transporter OA vers la droite lorsque B est un pôle austral, et vers la gauche si B est boréal.

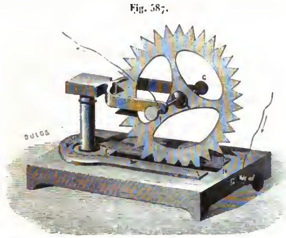
Toutes les forces qui agissent entre les éléments de courants en présence sont réciproques. Par exemple, si un élément m attire OA, en vertu d'une force p, OA, à son tour, exerce une action $-p$ sur m. Or la force $-p$ peut se transporter en B et se remplacer par un couple $(-p+p)$ et une force $(-p\mathrm{B})$; en faisant la même chose pour tous les éléments du solénoïde, on aura : 1° un couple résultant unique; or on démontre qu'il est nul; 2° une force appliquée en B, qui sera évidemment égale et contraire à celle qui agit sur l'élément OA; par conséquent elle sera égale à $\frac{\mu i \sin \omega ds}{r^2}$, elle agira perpendiculairement au plan AOB, elle transportera à la gauche du courant le pôle B s'il est austral, et à la droite s'il est boréal. Quand le courant est fixe et l'aimant mobile, c'est celui-ci qui se déplace; c'est au contraire le courant qui se meut si l'aimant est fixe; mais si tous les deux sont invariablement liés entre eux, le système ne se déplace pas, car chaque action élémentaire telle que p et $-p$ est détruite, et les forces résultantes le sont elles-mêmes; ce que l'on pouvait prévoir par une extension du principe de l'action et de la réaction.

Ce résultat s'applique à tout solénoïde indéfini, quelles que soient la forme de son axe et son orientation; s'il était terminé en M, il aurait en ce point un pôle inverse de B. En effet, un solénoïde fini BM peut être considéré comme la somme de deux autres, indéfinis tous les deux, le premier BMR que nous venons de considérer, le deuxième MR traversé par des courants contraires et confondu avec le précédent dans la partie indéfinie MR qu'il annule. Par conséquent, l'effet de OA sur un solénoïde fini BM se réduira à deux forces, appliquées en B et en M, perpendiculaires aux plans AOB, AOM, ayant des directions opposées, puisque les deux solénoïdes superposés ont des sens contraires, et qui seront exprimées en intensité par $\frac{\mu i \sin \omega ds}{r^2}$,

$\frac{\mu i \sin\omega' ds}{r'^2}$, en appelant ω' l'angle AOM et r' la distance OM. Telle est la loi élémentaire de l'action de OA sur le solénoïde fini MB, elle est indépendante de la forme et de la longueur de l'axe, et se réduit à l'effet des deux pôles.

Avant d'aller plus loin, nous pouvons montrer par une expérience élégante de M. Barlow que les pôles d'un aimant exercent sur des courants de petite longueur une action dirigée dans le sens que nous venons d'indiquer. Une roue dentée en cuivre, évidée pour être plus légère, est mobile autour d'un axe GF (*fig.* 587). Les dents dont son contour est garni vien-

Fig. 587.



nent, quand elle tourne, lécher la surface d'un bain de mercure dans une auge ED. Un courant électrique qui arrive au mercure par la poupée C, remonte verticalement par les dents de la roue du contour vers le centre, et retourne par l'axe au pôle négatif. Enfin un aimant AMB qui est fixé sur la base de l'appareil, présente ses deux pôles A et B aux deux faces de la roue.

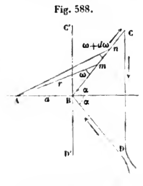
L'observateur placé dans le courant mobile sera vertical, il aura les pieds sur la pointe des dents, la tête vers l'axe FG, et s'il regarde le pôle boréal B, il sera sollicité par une force dirigée vers sa gauche de D en E. S'il se retourne de manière à regarder le pôle A, il sera chassé vers sa droite, ce sera encore

de D en E, car sa droite a changé de position pendant qu'il s'est retourné. Par conséquent, la roue qui conduit le courant devra se mouvoir de D vers E, et comme c'est en effet ce que montre l'expérience, on peut conclure que l'action des pôles d'un aimant sur un élément de courant, a réellement la direction que le calcul indique pour un solénoïde. Mais pour déterminer l'intensité de cette action, il faut s'adresser à des phénomènes plus précis.

La formule que nous venons d'écrire, et qui exprime l'action d'un solénoïde sur un élément de courant, va évidemment permettre de déterminer par des intégrations convenables l'effet exercé par ce solénoïde sur un courant quelconque dont la forme et la position seront connues. Nous allons l'appliquer au cas d'un courant angulaire indéfini.

ACTION D'UN SOLÉNOIDE SUR UN COURANT ANGULAIRE INDÉFINI. — Soit un courant indéfini DBC (*fig.* 588), composé de deux branches rectilignes DB, BC, faisant entre elles un angle 2α dont la bissectrice est AB; plaçons en A le pôle austral d'un solénoïde à une distance $AB = a$. Il est clair que tous les éléments tels que mn produiront sur A des forces perpendiculaires au plan CBD, agissant vers leur gauche, qui s'ajouteront et seront égales à $\frac{\mu i \sin\omega}{r^2}ds$. Nous allons calculer leur résultante.

Fig. 588.



Comptons s et ω à partir de B, nous aurons dans le triangle Amn

$$\frac{mn}{Am} = \frac{ds}{r} = \frac{\sin n A m}{\sin A n B} = \frac{\sin(-d\omega)}{\sin(\omega + d\omega)} = \frac{-d\omega}{\sin\omega}.$$

Dans le triangle ABm,

$$\frac{a}{r} = \frac{\sin\omega}{\sin\alpha}, \qquad \frac{1}{r} = \frac{\sin\omega}{a\sin\alpha};$$

et en remplaçant $\frac{ds}{r}$ et $\frac{1}{r}$ dans l'expression de l'action élé-

mentaire,

$$\varphi = -\frac{\mu i \sin\omega}{a \sin\alpha}\, d\omega,$$

dont l'intégrale générale est

$$\frac{\mu i \cos\omega}{a \sin\alpha}.$$

Il faut prendre cette intégrale entre $\omega = 0$ et $\omega = \alpha$ pour avoir l'action du courant CB, et doubler le résultat pour obtenir celle de DBC; ce qui donne

$$(1) \qquad F = \frac{2\mu i}{a}\,\frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha} = \frac{2\mu i}{a}\tang\frac{\alpha}{2}.$$

Si $\frac{\alpha}{2}$ est égale à 90 degrés, le courant DBC se change en D'BC', il devient rectiligne et vertical,

$$(2) \qquad F_1 = \frac{2\mu i}{a}.$$

Tant qu'il ne s'agit que d'un pôle de solénoïde A, les formules (1) et (2) n'ont pas besoin d'être vérifiées, puisqu'elles sont des conséquences mathématiques de la loi élémentaire de deux courants. Mais ce que nous nous sommes proposé de faire, c'est de prouver qu'un pôle de solénoïde peut se remplacer par celui d'un aimant; nous allons donc chercher par l'expérience si l'action du courant DBC sur le pôle A d'un aimant est représentée en réalité par $\frac{2\mu i}{a}\tang\frac{\alpha}{2}$. Les mesures ont été faites par MM. Biot et Savart de la manière suivante.

Le conducteur DBC était fixé sur un cadre très-grand; il marchait de D en B et en C, revenait en D et ensuite se repliait plusieurs fois sur lui-même. Son action sur A était proportionnelle au nombre des circonvolutions et se réduisait sensiblement à celle de la partie DBC. Son plan était perpendiculaire au méridien magnétique. Un aimant très-court était suspendu en A par un fil de soie au centre d'un ballon qui empêchait les agitations de l'air, et l'on mesurait la distance a du fil de suspension au point B. L'aimant se dirigeait et se maintenait perpendiculairement au cadre à la fois par la force directrice de la

terre et par l'action du courant; mais quand on le dérangeait de sa position d'équilibre en approchant un aimant extérieur, il y revenait par une suite d'oscillations dont on mesurait la durée au moyen d'un compteur à secondes.

Soit f l'action directrice de la terre. Sous son influence seule l'aiguille fait n oscillations en un temps T et l'on a, d'après une formule connue,

$$T = n\pi\sqrt{\frac{MK^2}{f}}, \quad f = \frac{n^2\pi^2 MK^2}{T^2}.$$

Soit F la force directrice du courant quand la distance AB est a. Sous l'influence réunie de F et de f, on avait N oscillations dans le même temps T :

$$F + f = \frac{N^2\pi^2 MK^2}{T^2},$$

et par suite

$$F = (N^2 - n^2)\frac{\pi^2 MK^2}{T^2}.$$

On obtenait de même, quand la distance était a',

$$F' = (N'^2 - n^2)\frac{\pi^2 MK^2}{T^2},$$

et enfin

$$\frac{F'}{F} = \frac{N'^2 - n^2}{N^2 - n^2}.$$

Comme l'intensité du courant variait pendant la durée des expériences, on exécutait alternativement et après des intervalles de temps égaux plusieurs mesures successives de F et de F', ce qui donnait les valeurs que nous désignerons par F_1, F'_1, F_2, F'_2,..., et on comparait F'_1 à $\frac{F_1 + F_2}{2}$, $\frac{F'_1 + F'_2}{2}$ à F_2, etc. On trouva ainsi que le rapport des forces directrices du courant sur l'aimant est en raison inverse des distances a et a'.

On changea ensuite l'angle α, et l'expérience prouva de même que F est proportionnelle à $\tang\frac{\alpha}{2}$; en résumé cette force peut s'exprimer par

$$F = \frac{A}{a}\tang\frac{\alpha}{2}.$$

Par conséquent, un courant angulaire indéfini agit sur un

aimant suivant la même loi mathématique que sur un solénoïde. Avant de tirer des conséquences de cette conclusion si capitale, nous allons la confirmer par de nouvelles épreuves, et montrer qu'elle prévoit et qu'elle explique l'action d'un courant rectiligne indéfini sur un aimant, quels que soient leur position et le mode de suspension de celui-ci. Dans ce cas α est égal à 90 degrés, et la formule devient $F_1 = \frac{2\mu i}{a}$, ou, en négligeant le facteur constant, $\frac{1}{a}$.

1°. **CAS DE L'EXPÉRIENCE D'ŒRSTED.** — Soient AB, A'B' (*fig.* 589) les projections d'une aiguille horizontale suspendue sur un pivot vertical OO'; M, IM' représentent le courant indéfini horizontal. Il est clair que ce courant développe deux forces, la première AE, A'Q' appliquée en A, A' et dirigée vers la gauche, la seconde BD, B'R' agissant en B, B' vers la droite, toutes deux dans des plans verticaux. Elles se décomposent en forces verticales AP et BS qui n'agissent point pour diriger le solénoïde, et en forces horizontales, l'une AQ, A'Q', l'autre BR, B'R', qui tendent à le placer dans un plan vertical perpendiculaire à celui du courant, le pôle austral étant à gauche et le pôle boréal à droite : c'est le résultat de l'expérience d'Œrsted.

Fig. 589.

2°. **CAS OU L'AIGUILLE EST SUSPENDUE SUR UN LIQUIDE.** — Il est évident que les composantes AQ A'Q', BR B'R' ne sont point égales, qu'elles se réduisent à un couple et à une force unique, et que si l'aiguille est soutenue sur un liquide, elle tendra d'abord à tourner de manière à ce que A'B' devienne perpendiculaire à IM', et ensuite à glisser dans le sens de sa longueur. Supposons que A'B' soit tout d'abord placée perpendiculairement au courant IM', le couple sera nul, et c'est l'excès de BR sur AQ qui fera mouvoir l'aiguille. Nous allons le calculer. Soient x et y les coordonnées de M, et $2l$ la longueur

de l'aiguille,

$$BR = f = BD \cos M' = \frac{1}{MB}\frac{y}{MB} = \frac{y}{y^2 + (l-x)^2},$$

$$AQ = f' = AE \cos M'' = \frac{1}{MA}\frac{y}{MA} = \frac{y}{y^2 + (l+x)^2},$$

$$f - f' = \frac{4lxy}{[y^2 + (l-x)^2][y^2 + (l+x)^2]}.$$

Cette force sera nulle si $y = 0$, c'est-à-dire si le courant touche l'aiguille, ce qui est évident, puisque alors les forces AE et BD sont verticales; elle sera nulle encore si $x = 0$, c'est-à-dire lorsque le courant est sur la verticale du point milieu O. L'équilibre est stable quand BR et AQ s'éloignent de O, car si l'on déplace le courant et qu'on le mette en M dans l'angle yOx, la composante BR est plus grande que AQ, et elle entraîne l'aiguille de B vers R, de manière à la ramener à sa position d'équilibre en plaçant le point O sur la verticale MI; mais si le courant change de direction, BR et AQ sont toutes deux dirigées vers O, et BR étant plus grand que AQ, le point O s'éloigne de MI, et l'aiguille est chassée de R vers B.

3°. **CAS D'UN COURANT VERTICAL ET D'UNE AIGUILLE HORIZONTALE.** — Soient encore AB et A'B' (*fig.* 590) les deux projections de l'aiguille horizontale soutenue sur un pivot OO', MI et M' celles d'un courant vertical. Les plans menés par ce courant et les deux pôles seront verticaux, et leurs traces seront M'A', M'B'. Les deux actions du courant seront égales à $\frac{1}{M'B'}$ et à $\frac{1}{M'A'}$; elles seront horizontales et se projetteront en grandeur réelle en B'D et A'C. Nous pourrons les décomposer en deux autres parallèles et perpendiculaires à l'aiguille.

Fig. 590.

Les deux forces A'Q et B'S se calculeront comme précédemment; elles tendraient à faire glisser l'aiguille dans le sens de sa longueur si elle nageait sur un liquide. Les deux autres B'R

et A′P agiront pour la faire tourner autour du point O′, si elle est soutenue sur un pivot; comme elles sont appliquées à des bras de levier égaux, le moment résultant sera proportionnel à leur différence. On a, en désignant par x et y les coordonnées de M′,

$$B'R = f = \frac{1}{M'B'} \cos RB'D = \frac{1}{M'B'} \frac{l-x}{M'B'} = \frac{l-x}{y^2+(l-x)^2},$$

$$A'P = f' = \frac{1}{M'A'} \cos CA'P = \frac{1}{M'A'} \frac{l+x}{M'A'} = \frac{l+x}{y^2+(l+x)^2},$$

$$f' - f = \frac{1}{M'B'^2} \frac{1}{M'A'^2} (x^2+y^2-l^2)\, 2x.$$

Quand M′ est placé sur $O'y$, $x = 0$, l'action est nulle et il y a équilibre; quand il est sur le cercle $x^2+y^2-l^2=0$ décrit du point O′ comme centre avec O′A′ pour rayon, l'action est encore nulle; mais dans l'intérieur de ce cercle elle est négative, ce qui veut dire que le point B′ est attiré, et que O′B′ vient s'appliquer sur le courant. Si M′ est à l'extérieur, $x^2+y^2-l^2$ étant positif, A′ est attiré jusqu'à ce que l'axe $O'y$ vienne se confondre avec O′M′, alors x est devenu égal à zéro, $f'-f$ est nul et l'aiguille est en équilibre; elle est perpendiculaire à O′M′, elle tourne son pôle austral à la gauche, son pôle boréal à la droite du courant. L'expérience a été faite par M. Pouillet; elle justifie tous ces résultats et par conséquent elle prouve que l'action du courant est en raison inverse de sa distance aux pôles, comme la formule $F_1 = \frac{2\mu i}{a}$ l'indique.

4°. **CAS D'UN COURANT HORIZONTAL ET D'UNE AIGUILLE VERTICALE.** — Supposons que le courant soit horizontal et se projette en M, et que l'aiguille AB soit suspendue à un fil de soie Ax (*fig.* 591). Les deux forces sont AC et BD perpendiculaires à AM et à BM; elles se décomposent comme précédemment, et leurs composantes normales AP et BR s'ajoutant pour déplacer l'aiguille, on a

$$AP = \frac{l-x}{y^2+(l-x)^2}, \quad BR' = \frac{l+x}{y^2+(l+x)^2},$$

$$AP + BR = \frac{2l}{AM^2 . BM^2} (y^2 - x^2 + l^2).$$

$y^2 - x^2 + l^2 = 0$ est l'équation d'une hyperbole passant par A et B. L'action sera donc nulle si le courant M est sur le contour de cette courbe, elle sera négative et l'aiguille sera repoussée s'il est dans l'intérieur de l'une ou de l'autre branche, elle sera positive et l'aiguille attirée s'il est en dehors des deux branches. Quand on change le sens du courant, le signe de ces actions change lui-même. Ampère a vérifié toutes ces conséquences du calcul.

Fig. 591.



Il est important de préciser la conclusion générale que l'on peut tirer de ces diverses expériences.

Nous connaissons la formule qui exprime l'action réciproque de deux éléments de courant : nous pouvons donc avec le seul secours du calcul déterminer l'effet résultant de deux courants quelconques de forme et de position déterminées : c'est ainsi que nous avons calculé l'action d'un solénoïde sur un élément de courant, et ensuite celle de ce solénoïde sur un courant indéfini angulaire ou rectiligne.

Il est impossible de suivre la même marche pour découvrir les forces qui s'exercent entre les aimants et les courants. Puisque nous ne connaissons aucune relation théorique entre le magnétisme et l'électricité, et que nous ignorons en quoi consiste un élément magnétique, nous ne pouvons déterminer l'action de cet élément magnétique sur un élément de courant, et tant que cette action nous sera inconnue, il nous sera impossible de calculer les forces résultantes qui agissent entre un aimant de forme et de position quelconques, et un courant déterminé placé dans son voisinage.

Mais, d'une part, nous avons trouvé par le calcul qu'un courant angulaire indéfini exerce sur le pôle d'un *solénoïde* situé dans son plan une force perpendiculaire à ce plan et exprimée par $\frac{2\mu i}{a} \tang \frac{\alpha}{2}$, et d'un autre côté l'expérience de Biot et Savart nous a montré que l'action du même courant sur le pôle d'un *aimant* est exprimée par la même formule.

Dans ces conditions, un aimant est donc identique à un solénoïde.

Ampère a été plus loin; trouvant que l'action résultante d'un pôle d'*aimant* ou de *solénoïde* sur un courant indéfini est identique, il a conclu que l'action de ces mêmes pôles sur un *élément* de courant est aussi identique, c'est-à-dire qu'elle est perpendiculaire au plan passant par l'élément et le pôle, et exprimée par la formule $\frac{\mu i \sin\omega\, ds}{r^2}$, qu'il s'agisse d'un solénoïde ou d'un aimant.

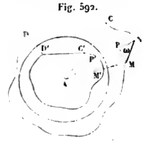
Ce raisonnement se réduit à ceci : puisque l'intégrale définie $\frac{2\mu i}{a}\tang\frac{\alpha}{2}$ représente à la fois l'action d'un courant indéfini sur un pôle d'aimant ou sur un pôle de solénoïde, les expressions différentielles qui expriment l'effet d'un élément de courant sur chacun de ces pôles sont aussi les mêmes.

Il est évident que cette conclusion n'est pas légitime; mais si l'on répète pour des cas très-nombreux le même mode de raisonnement, et si l'on trouve toujours que l'intégrale définie trouvée théoriquement pour le solénoïde s'applique expérimentalement à l'aimant, alors il sera exact de dire que l'expression différentielle $\frac{\mu i \sin\omega\, ds}{r^2}$ s'applique aussi aux deux appareils. C'est dans ce but que nous allons étudier encore le problème qui suit.

ROTATION DES COURANTS PAR L'ACTION DES SOLÉNOÏDES OU DES AIMANTS.

Soient MN un élément de courant, et A le pôle d'un solénoïde (*fig.* 592). L'action exercée sur MN est une force F perpendiculaire à AMN et égale à $\frac{\mu i \sin\omega\, ds}{r^2}$, ou, en négligeant le facteur μi, à $\frac{\sin\omega\, ds}{r^2}$. Si l'on abaisse MP perpendiculaire sur AN, $MP = ds \sin\omega$, et si l'on décrit du point A comme centre une sphère de rayon égal à

Fig. 592.



l'unité, elle sera coupée par le plan AMN suivant l'arc M'P' égal à $\frac{MP}{r}$, ou à $\frac{\sin\omega\, ds}{r}$. Donc

$$\varphi = \frac{M'P'}{r};$$

enfin le moment de rotation de l'élément MN, autour du point A, sera

$$\varphi r = M'P'.$$

Ce moment est donc perpendiculaire au plan AM'P', et représenté en grandeur par M'P'. La même chose ayant lieu pour tous les éléments d'une portion quelconque CMD de courant, le moment du couple résultant sera lui-même, d'après un théorème connu, représenté en grandeur par la diagonale D'C', et perpendiculaire au plan AC'D'.

Il résulte de là que si le courant CMD est fermé, C'D' est nul et le couple résultant est égal à zéro, c'est-à-dire que l'action d'un pôle A de solénoïde sur ce courant fermé se réduit à une force unique passant par le point A.

Calculons maintenant, quand le courant n'est pas fermé, la valeur du moment de rotation autour d'un axe XY, passant par le pôle A (*fig.* 593). L'action est dirigée, suivant la normale MQ, au plan AMN; elle se décompose en deux forces, l'une dans le plan XAM, qui est sans action, l'autre MR normale à ce plan, et qui produit la rotation. Si nous désignons par ε l'angle QMR, qui est celui des deux plans XAM et MAN, nous avons

Fig. 593.

$$MR = \frac{\mu i \sin\omega\, ds}{r^2}\cos\varepsilon.$$

Pour avoir le moment de rotation m, il faut multiplier MR par la perpendiculaire abaissée de M sur XY; elle est égale à $r\sin\theta$,

$$m = \frac{\mu i\, ds}{r}\sin\omega\sin\theta\cos\varepsilon.$$

Dans l'angle trièdre dont le sommet est en A et la base en XMN, on a

$$\cos XAN = \cos XAM \cos MAN + \sin XAM \sin MAN \cos \varepsilon,$$

$$\cos(\theta + d\theta) = \cos\theta \cos MAN + \sin\theta \sin MAN \cos\varepsilon.$$

L'angle MAN étant infiniment petit, son cosinus est égal à l'unité, et son sinus se trouve comme il suit :

$$\frac{\sin MAN}{\sin ANM} = \frac{\sin MAN}{\sin(\omega + d\omega)} = \frac{ds}{r}, \quad \sin MAN = \frac{ds \sin\omega}{r};$$

en remplaçant le cosinus et le sinus de MAN par leurs valeurs dans l'équation précédente, il vient

$$-\sin\theta\, d\theta = \frac{ds}{r} \sin\omega \sin\theta \cos\varepsilon,$$

et en comparant cette valeur avec celle du moment de rotation,

$$m = -\mu i \sin\theta\, d\theta.$$

Si l'on intègre entre les limites θ_1 et θ_2 d'un courant quelconque, le moment total P sera

$$P = \mu i (\cos\theta_1 - \cos\theta_2).$$

Lorsque l'axe XY passera à la fois par les deux pôles du solénoïde, il faudra retrancher les deux moments de rotation

$$P - P' = \mu i (\cos\theta_1 - \cos\theta_2 - \cos\theta'_1 + \cos\theta'_2),$$

expression qui est nulle si le courant est fermé, car alors $\theta_1 = \theta_2$, et $\theta'_1 = \theta'_2$.

Tous les courants sont nécessairement fermés, mais on peut faire en sorte qu'une de leurs parties seulement soit mobile autour de l'axe d'un solénoïde, et le moment de rotation de celle-ci peut n'être point nul. Nous allons examiner le cas où elle est terminée en deux points M et M' situés sur l'axe AB (*fig.* 594, 595 et 596).

1°. M et M' peuvent être placés tous deux au-dessus des pôles A et B, ou tous deux entre ces pôles; dans ce cas, $\theta_1 = \theta_2$, $\theta'_1 = \theta'_2$, et $P - P'$ est nul (*fig.* 594).

2°. M peut être au-dessus, M' au-dessous des deux pôles

(*fig.* 595); dans ce cas, $\theta_1 = \theta'_1 = 0$, $\theta_2 = \theta'_2 = \pi$, et $P - P'$ est encore nul.

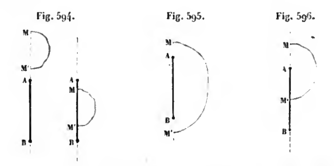


Fig. 594. Fig. 595. Fig. 596.

3°. Mais si l'un des pôles, A, est compris entre M et M' et que l'autre, B, soit au-dessous de M et de M' (*fig* 596), on a

$$\theta_1 = 0, \quad \theta_2 = \pi, \quad \theta'_1 = \theta'_2 = 0,$$

et, par suite,

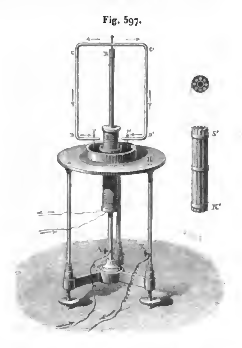
$$P - P' = 2\mu i.$$

Le courant tournera autour de l'axe AB, et le moment de rotation ne dépendra ni de la position du courant mobile, ni de son étendue.

Pour réaliser les conditions de ce calcul, j'ai fait disposer l'appareil suivant (*fig.* 597). AB est une colonne de cuivre isolée sur une base en ivoire, et par laquelle le courant arrive dans une coupe B; il descend ensuite le long de deux branches mobiles BCD, BC'D', formées par un tube d'aluminium, et il vient par deux pointes F et F', très-voisines l'une de l'autre, dans un godet annulaire de fer plein de mercure; de là il est ramené par les supports jusqu'en K, et enfin jusqu'à la pile. On voit que les parties mobiles du courant sont limitées à un point B situé sur l'axe et aux deux pointes F et F' très-voisines de cet axe, et qu'on peut, sans erreur sensible, considérer comme étant confondues avec lui. Un solénoïde NS enroulé sur un cylindre creux, peut glisser le long de la ligne AB; si on le soulève de manière à placer ses deux pôles entre les limites B et F du courant, ou qu'on l'abaisse jusqu'à les mettre tous deux au-dessous de F et de F', on ne voit aucun mouvement dans le conducteur mobile; mais celui-ci se met à tourner avec une

grande rapidité, quand le pôle S est au-dessus des deux pointes F et F′, et que le second pôle N est au-dessous.

Fig. 597.



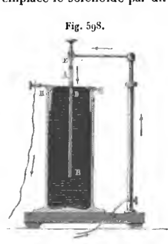
L'important n'est pas de faire voir qu'un solénoïde se conduit suivant les prévisions du calcul, c'est de montrer qu'un aimant les réalise toutes et de la même manière. A cet effet, on enlève le solénoïde NS, et on le remplace par un faisceau magnétique N′S′, disposé sur un cylindre creux du même calibre que l'axe AB, et on reconnaît que le mouvement du conducteur se produit ou s'arrête quand l'aimant occupe les positions qu'il fallait donner au solénoïde pour le produire ou l'arrêter; et puisque dans ce second exemple l'intégrale définie qui exprime le moment de rotation, est la même pour l'aimant et le solénoïde, il devient légitime d'admettre que l'action élémentaire que ces deux appareils exercent sur un élément de courant est aussi la même. Voici de nouvelles expériences qui confirment la précédente, ainsi que la conclusion que j'en viens de tirer.

ROTATION DES AIMANTS PAR LES COURANTS. — Puisque le moment de rotation d'un courant fermé autour de l'axe d'un solénoïde est nul, le moment de réaction qui tendrait à faire tourner ce solénoïde autour de ce même axe est lui-même également nul. On peut en conclure que si on décompose le courant en deux parties quelconques, toutes deux feront naître des couples égaux et contraires, et si on parvient à détruire l'effet de l'un deux, celui de l'autre sera de faire tourner le solénoïde.

Or il est de l'essence des forces réciproques de se détruire quand les parties entre lesquelles elles s'exercent sont solidaires. Si donc une portion du courant traverse le solénoïde lui-même, elle ne lui donnera aucun mouvement, et toutes les autres parties de ce même courant détermineront un moment de rotation égal et contraire à celui qu'elles éprouveraient elles-mêmes si elles étaient mobiles, et que le solénoïde fût fixe.

Nous venons de voir que tout courant terminé sur l'axe XY en deux points M, M', l'un entre les deux pôles, l'autre au-dessus d'eux (*fig.* 596), est sollicité par un couple indépendant de sa forme et égal à $2\mu i$; par conséquent, si l'on dirige le courant d'une pile à travers le solénoïde, en le faisant entrer par le point M et sortir par M', il déterminera un moment de rotation égal à $-2\mu i$, et l'expérience devra réussir si l'on remplace le solénoïde par un aimant.

Fig. 598.

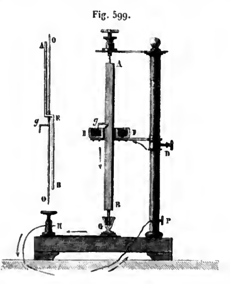


Ampère a réalisé ces conditions en plongeant dans l'axe d'une éprouvette pleine de mercure un aimant AB (*fig.* 598), lesté en B par un poids de platine qui le prolonge, et terminé en A par un godet dans lequel on verse une goutte de mercure. Le courant arrive en A par une vis pointue qu'on règle convenablement; il descend d'abord de E jusqu'à la surface du bain en D, et dans cette portion de son parcours il n'influe pas sur

l'aimant; il s'échappe ensuite en rayonnant vers les bords de l'éprouvette, où il rencontre un anneau métallique HH en communication avec le pôle négatif. Tout se passe donc comme si l'aimant était sollicité par un courant non fermé terminé en deux points de l'axe, l'un E au-dessus des pôles, l'autre D placé entre les deux.

On peut employer encore un appareil plus commode, construit par M. Breton (*fig.* 599). L'aimant peut tourner autour

Fig. 599.



de deux pointes A et B; le courant monte par une colonne PD, et arrive dans un vase annulaire EF, qui est rempli de mercure; il pénètre, par un crochet *g*, dans l'aimant qu'il suit jusqu'au godet G, et il retourne au pôle négatif par H. Sauf la différence de construction, cet appareil est identique à celui d'Ampère.

ROTATION D'UN AIMANT PARALLÈLEMENT A SON AXE. — L'action résultante totale d'un courant sur un solénoïde se réduit nécessairement à un couple et à une force. Or nous venons de voir que le moment de rotation est nul, si le courant est fermé et l'aimant mobile autour de son axe AB : cela veut dire que le couple est dans un plan passant par AB, et que la force est appliquée en un point de cette ligne. Par conséquent, si l'ai-

mant était mobile autour d'un axe parallèle à AB, mais non confondu avec cette ligne, le couple serait encore détruit; mais la force agirait, et comme elle changerait nécessairement de direction avec la position du solénoïde, elle pourrait lui imprimer un mouvement de rotation.

C'est ce qu'on vérifie avec un aimant dans l'appareil de la *fig.* 598, en faisant arriver le courant par la pointe E, abaissée jusqu'au niveau du mercure, et en plaçant l'aimant excentriquement en A (*fig.* 600), il se met à tourner.

Fig. 600.

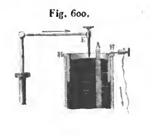
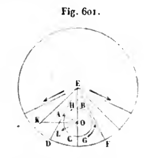


Fig. 601.



Pour expliquer plus complétement cette expérience, représentons (*fig.* 601) une coupe horizontale de l'appareil, menée par la surface du mercure. La pointe est projetée en E, le centre du solénoïde est en O; les courants qui le composent sont en $\underset{\rightarrow}{\text{CGBH}}$, ceux qui arrivent par la pointe se dirigent en rayonnant du centre E vers la circonférence DF, et ce sont ceux qui passent le plus près du solénoïde qui exercent une action prédominante et déterminent le sens de l'effet produit. Or $\underset{\rightarrow}{\text{BAC}}$ est attiré, et $\underset{\rightarrow}{\text{CGB}}$ est repoussé par $\underset{\rightarrow}{\text{ED}}$; mais la première action est plus grande que la seconde, et leur différence agit suivant OA perpendiculaire à ED. Un courant $\underset{\rightarrow}{\text{EF}}$, symétrique de OD, fera naître une autre force OL perpendiculaire à sa direction et égale à OA, et la résultante de OA et de OL sera OK qui est perpendiculaire à la ligne EO, et qui fait décrire à l'aimant une spirale dont le sens change avec la nature du pôle et le sens des courants dans le mercure.

On peut produire un mouvement de rotation par la même

cause, en remplaçant dans l'appareil de M. Breton l'aimant tournant par l'aimant excentrique et courbé AEB (*fig.* 599). Les deux pôles sont placés des deux côtés de l'axe, parce que les forces qui les sollicitent sont de signe contraire.

En résumé, puisque dans tous les cas qui ont été traités il a été possible de vérifier avec un aimant toutes les propriétés que le calcul avait indiquées pour un solénoïde de même longueur et d'intensité convenable, on peut admettre :

1°. Que l'action d'un pôle d'aimant sur un élément de courant est la même que celle d'un pôle de solénoïde, c'est-à-dire qu'elle est normale au plan passant par l'élément et le pôle, et égale en intensité à $\frac{\mu i \sin\omega ds}{r^2}$, ω étant l'angle de l'élément et de la droite qui le joint au pôle;

2°. Que l'effet exercé par un aimant sur un système de courants quelconques pourra se calculer en intégrant la formule élémentaire $\frac{\mu i \sin\omega ds}{r^2}$, et qu'il sera toujours le même que celui d'un solénoïde équivalent.

Mais il faut aller plus loin, et montrer que non-seulement dans leurs relations avec les courants, mais encore dans leurs relations réciproques, les aimants peuvent être remplacés par des solénoïdes.

Il est évident d'abord « qu'un aimant AB agira sur un solénoïde A'B', comme le ferait un solénoïde équivalent », car son action se réduit à la résultante des forces que ses pôles exercent sur chaque élément de A'B', et elles sont les mêmes que celles qui sont produites par les pôles du solénoïde qui lui est équivalent. Il ne reste donc qu'à calculer l'action de deux solénoïdes entre eux.

Ampère a démontré que si SS', dd' représentent les surfaces et les distances des cercles élémentaires dans les deux solénoïdes et i, i' les intensités de leurs courants, il y a entre deux quelconques de leurs pôles une force qui est attractive ou répulsive, s'ils sont de nom contraire ou de même nom, qui est en raison inverse du carré de leur distance r, et exprimée par

$$F = \mu \frac{Si}{d} \frac{S'i'}{d'} \frac{1}{r^2}.$$

C'est précisément l'action qui serait exercée entre deux pôles de deux aimants qui auraient des intensités magnétiques équivalentes.

Donc un aimant a toutes les propriétés d'un solénoïde confondu avec lui et équivalent en intensité, soit quand il agit sur un courant, soit quand il est mis en présence d'un système quelconque d'autres aimants.

Après avoir démontré cette identité absolue des propriétés que nous offrent les solénoïdes et les aimants, Ampère fut naturellement conduit à expliquer par la même théorie le magnétisme et l'électricité. Deux hypothèses également possibles se présentaient à lui : il pouvait ou bien admettre l'existence d'un fluide magnétique et en faire dériver les courants électriques, ou bien conserver l'hypothèse des courants et supposer qu'ils existent dans le fer aimanté où ils constituent des solénoïdes moléculaires. C'est le sujet qui nous reste à traiter dans la Leçon suivante.

SOIXANTE-DOUZIÈME LEÇON.

MAGNÉTISME ET DIAMAGNÉTISME.

Théorie du magnétisme. — Constitution des aimants. — Aimantation par les courants. — Magnétisme terrestre.
Diamagnétisme. — Polarité diamagnétique. — Influence du milieu ambiant. — Influence de la structure. — Mesure des pouvoirs magnétiques. — Résultats numériques.

THÉORIE DU MAGNÉTISME.

Nous avons exposé et discuté la théorie des fluides électriques et magnétiques. Imaginés pour satisfaire au besoin d'expliquer, ils ont cette commodité de rattacher les faits par une relation hypothétique à une cause possible. Mais par cela même que c'est notre imagination qui les a inventés, en leur donnant gratuitement des propriétés qui traduisent les lois observées, ils n'ont pas d'existence démontrée, et nous pouvons y renoncer sans aucun scrupule, si nous venons à découvrir ou leur insuffisance ou leur inutilité. Or leur insuffisance a été reconnue quand OErsted à découvert l'action d'un courant sur un aimant, que rien ne faisait soupçonner, et l'inutilité des fluides magnétiques est devenue manifeste quand Ampère eut prouvé qu'on peut reproduire toutes les propriétés des aimants avec des courants enroulés en hélice : cela conduisait naturellement à penser que les aimants sont des solénoïdes réels constitués par des courants intestins.

CONSTITUTION DES AIMANTS. — D'après ces idées, Ampère abandonne absolument l'hypothèse du fluide magnétique; mais il la remplace par une autre. Il suppose que dans un barreau aimanté (*fig.* 603) les molécules peuvent être groupées en files AB, *ab*, *a'b'* sensiblement parallèles à l'axe; qu'elles sont entourées par des courants circulaires de même sens, dont les plans sont perpendiculaires aux lignes AB, *ab*,..., et qu'elles

constituent ainsi un faisceau de solénoïdes élémentaires agissant comme un solénoïde résultant unique.

Si l'aimant avait une grande longueur et un petit diamètre, tous ces courants seraient perpendiculaires à l'axe AB; mais en général leurs réactions mutuelles s'opposent à ce qu'ils le soient rigoureusement. Ils le seront sur l'axe AB (*fig.* 602),

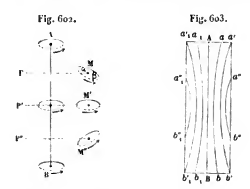


Fig. 602. Fig. 603.

à cause de la symétrie; mais celui qui entoure une molécule quelconque M sera dans des conditions différentes : il sera repoussé par ceux qui sont à droite ou à gauche, parce qu'il marche dans un sens contraire au leur dans les parties les plus voisines. Supposons que M soit à la droite de l'axe et dans la partie supérieure de l'aimant, il est évident que la partie α sera repoussée par tous les courants qui sont à la droite de M, et β par ceux qui sont à la gauche. Ces deux actions seront dirigées de bas en haut, parce qu'il y a plus de courants au-dessous qu'au-dessus de PM, et la première sera plus grande que la seconde, parce qu'il y en a aussi un plus grand nombre du côté de l'axe que du côté opposé. Donc la partie α se relèvera, d'autant plus que M sera plus loin de l'axe AB et de la section moyenne P'M' de l'aimant; elle n'éprouvera aucune action pour un point M' situé sur P'M', et elle s'abaissera si on considère M'' au-dessous de P'M'.

Il suit de là que si on mène les lignes assujetties à être normales aux plans de ces divers courants, elles seront les axes d'autant de solénoïdes juxtaposés (*fig.* 603); elles seront courbes et tourneront vers l'axe leur convexité, qui sera d'au-

tant plus prononcée qu'elles s'approcheront davantage des bords et que l'aimant sera plus gros et moins long. Or les pôles de tous les solénoïdes étant aux extrémités mêmes de ces courbes, ceux de l'aimant seront les deux points d'application des résultantes des forces que les solénoïdes exerceront, et il est clair qu'ils seront placés à une certaine distance des extrémités; elle sera d'autant plus grande que l'aimant sera plus gros, ce qui est conforme à l'observation.

AIMANTATION. — Il ne suffisait point d'expliquer la constitution d'aimants tout formés, il fallait encore concevoir comment ils naissent pendant l'aimantation. Ampère a supposé que les molécules du fer, de l'acier, et en général des corps magnétiques, sont entourées, même dans leur état naturel, par des courants préexistants, dont les plans sont absolument quelconques, et qui détruisent réciproquement leurs effets, parce qu'il y a toujours dans une même direction le même nombre de courants inverses. Mais si on place dans le voisinage un aimant tout formé, c'est-à-dire un faisceau de solénoïdes parallèles, ceux-ci attireront ou repousseront les courants élémentaires du fer ou de l'acier, suivant les lois connues de l'électrodynamique, ils les dirigeront tous dans un même sens et dans des plans parallèles, et par conséquent ils les disposeront en un faisceau de solénoïdes juxtaposés, ce qui constituera un aimant.

Prenons comme exemple le cas simple représenté (*fig.* 584), où un aimant AB serait en présence d'un fer doux A′B′. Les courants moléculaires préexistants dans ce dernier deviendront parallèles à ceux de l'aimant, A′B′ s'aimantera et prendra en A′ un pôle de nom contraire à celui de l'aimant, avec lequel il est en contact.

En résumé, l'aimantation n'est rien autre chose qu'un phénomène d'orientation des courants moléculaires par l'action mécanique qu'exercent sur eux les courants extérieurs. Si cela est, ce que l'on nomme la force coercitive s'expliquerait par la facilité plus ou moins grande avec laquelle les courants moléculaires pourraient changer leur direction première. Dans le fer doux, ils seraient extrêmement mobiles, et leur déplacement se ferait instantanément et sans résistance, sous l'in-

fluence des moindres actions extérieures : dans l'acier, au contraire, ils seraient presque fixes et résisteraient énergiquement à toute force directrice. D'où il suit que le fer s'aimanterait et se désaimanterait au voisinage d'un aimant même faible, et que l'acier ne pourrait prendre ou perdre du magnétisme que par des causes plus énergiques et plus longtemps continuées.

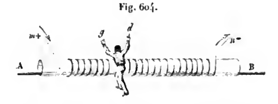
En fait de systèmes destinés à résumer toute une classe de faits nombreux, il faut toujours arriver à supposer une cause. Cette nécessité est commune à la théorie des deux fluides et à celle d'Ampère; mais celle-ci a sur celle-là une supériorité incontestable de simplicité, de généralité et de fécondité : de simplicité, car une fois qu'on a admis l'existence de courants moléculaires tout formés, mobiles dans le fer et fixes dans l'acier, l'aimantation et toutes les propriétés des aimants sont des conséquences qu'on peut calculer; de généralité, puisqu'on substitue aux deux fluides spéciaux du magnétisme et de l'électricité une seule cause qui est le courant électrique; et enfin de fécondité, car on prévoit, outre les phénomènes magnétiques et électromagnétiques, un mode nouveau et plus rationnel d'aimantation.

AIMANTATION PAR LES COURANTS. — En effet, si l'aimantation n'est produite que par l'orientation dans des directions parallèles des courants moléculaires du fer sous l'influence de courants extérieurs, on pourra la déterminer non plus seulement en faisant agir sur un barreau un aimant tout formé, mais en faisant agir des courants quelconques. Arago fut le premier à déduire et à vérifier cette conséquence de la théorie d'Ampère. Il plongea un fil de cuivre traversé par le courant d'une pile dans de la limaille de fer : il vit celle-ci s'attacher au conducteur, et chaque parcelle se placer en croix avec lui; puis il disposa le même courant dans le voisinage d'une aiguille d'acier et perpendiculairement à sa direction, et elle s'aimanta de telle sorte que le pôle austral était à gauche, comme dans l'expérience d'Œrsted. Il continua ces recherches conjointement avec Ampère, et tous deux arrivèrent aux résultats suivants.

Formons une spirale ou un solénoïde avec un courant replié

sur un tube de verre (*fig.* 604), figurons le sens de ce courant

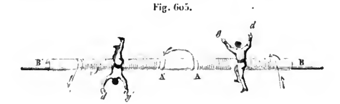
Fig. 604.



par la poupée *gd*, et plaçons une aiguille d'acier dans l'intérieur; aussitôt que le courant passera dans le conducteur, il dirigera parallèlement à lui-même tous les courants moléculaires du barreau, qui alors prendra deux pôles, l'un austral à gauche, en A, l'autre boréal à droite, en B.

La formation des points conséquents se prévoit, s'obtient et s'explique avec autant de netteté; il suffit, pour en développer un, de disposer sur un tube de verre deux hélices juxtaposées formées avec le même fil dans des sens contraires (*fig.* 605) :

Fig. 605.



la droite du courant est dans chacune d'elles en *d* et *d'* vers les extrémités B et B', où se forment deux pôles boréaux, et la gauche est située en *g* et *g'* vers l'espace moyen AA', où l'on voit se former un double pôle austral, c'est-à-dire un point conséquent. On en obtiendrait autant qu'on le voudrait aux lieux de juxtaposition d'un nombre quelconque d'hélices successives, dont les sens seraient alternativement opposés.

Ce qui est le plus remarquable dans ces expériences, c'est que l'aimantation se fait instantanément; elle présente d'ailleurs des circonstances différentes, suivant qu'on opère sur l'acier ou sur le fer.

Si le courant est intense, un barreau d'acier trempé prend une intensité magnétique extrêmement grande, qui persiste

ensuite en diminuant peu à peu jusqu'à la saturation permanente.

M. Elias de Harlem, avec le concours de M. Logemann, a découvert une méthode pratique pour obtenir par ce procédé des aimants permanents beaucoup plus forts que ceux qu'on prépare par l'aimantation ordinaire. On croit savoir qu'il fait agir des courants sur un acier particulier et très-fortement trempé; mais on ignore les détails de l'opération, qu'il tient secrète par un motif qu'on ne peut s'empêcher de regretter. L'École Polytechnique a acquis l'un de ces aimants, du poids de 75 kilogrammes, et qui en porte 150.

Quand on emploie du fer doux, il perd son aimantation aussi rapidement qu'il l'a gagnée, aussitôt que le courant cesse d'agir. C'est ce qu'on peut démontrer par un appareil ingénieux, que M. Froment construit, et qu'il nomme *sirène électrique*. Elle se compose d'un morceau de fer doux entouré par un conducteur hélicoïdal, et devant lequel est un contact mobile qu'un ressort tient éloigné, mais qui peut venir toucher le fer quand celui-ci est aimanté. Le courant passe toutes les fois que ce contact est éloigné, alors il est attiré; mais son mouvement ouvre le circuit, aussitôt le fer doux se désaimante; alors le ressort agissant sur le contact le ramène à sa position première et ferme de nouveau le circuit. Il en résulte un mouvement de va-et-vient assez rapide pour produire un son dont l'acuité augmente avec la rapidité des oscillations, et on fait varier celle-ci en diminuant l'étendue de la course du contact.

Lorsque le courant persiste dans l'hélice magnétisante, l'aimantation persiste également dans le fer doux et produit ainsi des électro-aimants temporaires extrêmement intenses. Pour les obtenir, on choisit le fer le plus doux qu'on puisse rencontrer, on le recourbe en fer à cheval AOB (*fig.* 606), et l'on entoure ses deux extrémités de deux bobines de fils enroulés M et N, à tra-

Fig. 606.



vers lesquelles on fait passer le courant. Si le noyau de fer était rectiligne, les deux bobines devraient être deux portions d'un même solénoïde; mais en le recourbant en fer à cheval, le sens du courant devient contraire dans M et dans N; le pôle austral est en A à la gauche de la flèche N, et le pôle boréal en B à la droite de M. On peut suspendre cet appareil a une potence et lui présenter un contact de fer doux; celui-ci adhère aux pôles A et B, et il faut plusieurs centaines de kilogrammes pour le séparer.

L'intensité du magnétisme que peut prendre un barreau de fer doux dépend de l'intensité du courant, du nombre des spires de l'hélice et enfin de la longueur et du diamètre du fer. Ce que l'on sait de positif sur ce sujet est dû à M. Muller.

La longueur du cylindre, quand elle dépasse une certaine limite, n'a point d'influence sensible. Si on représente par I l'intensité du courant, par n le nombre des tours, par d le diamètre du fer, par m le moment magnétique de l'aimant formé, et par A une constante qui varie avec le métal qu'on emploie, on a la formule empirique

$$nI = Ad^{\frac{3}{2}} \operatorname{tang} \frac{m}{0,00005d^2},$$

ou

$$\frac{m}{0,00005d^2} = \operatorname{arc\,tang} \frac{nI}{Ad^{\frac{3}{2}}}.$$

Supposons d'abord que l'intensité ne soit pas très-grande, l'arc peut être pris comme égal à sa tangente, ce qui donne

$$m = 0,00005d^2 \frac{nI}{Ad^{\frac{3}{2}}} = DnI\sqrt{d}.$$

Le moment magnétique est proportionnel à la racine carrée du diamètre d, à l'intensité I et au nombre des tours n. Cette loi avait été énoncée, comme étant générale, par MM. Lenz et Jacobi; elle est assez exacte pour qu'on puisse l'admettre dans la plupart des cas.

Mais quand l'intensité croît jusqu'à l'infini, la tangente $\frac{nI}{Ad^{\frac{3}{2}}}$ devient infinie, et l'arc qui lui correspond égal à 90 de-

grès; donc

$$m = Bd^2;$$

ce qui prouve que l'électro-aimant atteint une limite de saturation proportionnelle au carré de son diamètre.

MAGNÉTISME TERRESTRE. — On a démontré (tome I, pages 503 et suivantes) que la terre dirige l'aiguille d'inclinaison et de déclinaison, comme le ferait un aimant gros et court, dont l'axe serait perpendiculaire à l'équateur magnétique. D'autre part, on a fait voir dans la 70e Leçon que l'action du globe sur des courants mobiles s'explique en supposant qu'il existe dans les régions de l'équateur un courant marchant de l'est vers l'ouest. Comme cette action se produit dans tous les lieux du globe, il faut que ce courant soit fermé et enveloppe la terre d'un grand cercle. Ces deux conclusions sont tout à fait concordantes, car le courant circulaire constitue un solénoïde gros et court, ou un aimant dont le pôle austral est vers la gauche d'un observateur qui aurait les pieds à l'est et la tête à l'ouest, et qui regarderait le centre du globe, c'est-à-dire vers le sud, et dont le pôle boréal serait à droite ou dans la direction du nord. On peut donc expliquer tous les effets produits sur une aiguille aimantée et sur un courant mobile, en admettant dans le noyau terrestre, soit un aimant central, soit un courant; il n'y a qu'à se demander quelle est celle des deux hypothèses qui est la plus probable.

Toutes les fois qu'on creuse un puits dans l'écorce terrestre, on reconnaît que la température s'élève, dans nos climats, de 1 degré environ par 30 mètres. Si on admet que cette progression se continue indéfiniment, on trouve qu'à la profondeur de 12 lieues, la température serait celle de la fusion du fer. A la vérité, rien ne prouve que l'accroissement de température se continue jusqu'au centre; il est même probable qu'il s'arrête à une limite déterminée; mais les idées cosmogéniques et géologiques, aussi bien que les phénomènes volcaniques, démontrent qu'à cette limite la température est assez élevée pour tenir en fusion les matières les plus réfractaires. Or on sait que le magnétisme du fer ne persiste point à la température rouge : par suite, il faut renoncer à l'hypothèse d'un aimant central. Si d'ailleurs il existait, il ne pourrait se déplacer, et les variations

séculaires, annuelles et diurnes seraient difficilement explicables.

Mais tandis que la constitution du globe exclut l'hypothèse d'un aimant central, les phénomènes qui se passent dans son intérieur et à sa surface font prévoir l'existence de courants. Toutes les actions chimiques en produisent, tous les phénomènes de propagation calorifique en font naître, et toutes les causes qui développent l'électricité atmosphérique déterminent manifestement des mouvements continus de fluides dans le sol.

Parmi ces causes diverses, on en trouve qui éprouvent des variations séculaires, ce sont celles qui affectent la terre tout entière; d'autres changent périodiquement et repassent par les mêmes valeurs, soit dans les mêmes saisons des diverses années, soit aux mêmes heures de chaque jour: ce sont les phénomènes calorifiques qui dépendent du soleil; enfin il y en a qui sont accidentelles, ce sont celles qui produisent les aurores boréales. Il doit donc y avoir des courants dans la terre, et il faut qu'ils éprouvent des variations séculaires, annuelles, diurnes et accidentelles.

La multiplicité des causes, la connaissance très-imparfaite qu'on en a, ne permettent guère d'ailleurs de prédire le sens des courants terrestres; mais il est clair que tous ceux-ci, en superposant leur action, doivent produire sur l'aiguille aimantée un effet égal à celui d'un courant résultant unique. C'est ce courant résultant qui va de l'est à l'ouest, et qui parcourt l'équateur magnétique.

On comprend aisément que le courant résultant ne doit pas avoir exactement la même direction, ni la même intensité pour chaque lieu, ce qui revient à dire que chaque point du globe est influencé comme il le serait par un courant fictif traversant un cercle équatorial, lequel varierait de position avec ce point. De là résulte que les courbes magnétiques n'ont pas la régularité que la théorie leur assigne.

Une seule de ces causes du courant terrestre peut être discutée : c'est l'action du soleil. Comme il marche de l'est à l'ouest, il détermine un échauffement dans le même sens, et cette dissymétrie du mouvement calorifique doit faire naître une force électromotrice agissant dans le même sens. En dis-

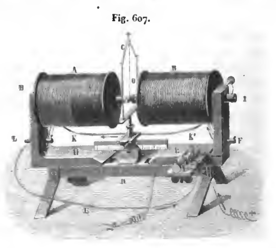
cutant cette idée, Aimé est arrivé à rendre assez fidèlement compte des variations magnétiques; mais ce sujet est encore trop obscur pour que nous nous y arrêtions.

DIAMAGNÉTISME.

On n'a connu pendant longtemps qu'un très-petit nombre de métaux magnétiques : le fer, le nickel, le cobalt, le manganèse et le chrome. Quant aux autres substances, on les considérait comme indifférentes à l'action des aimants. Cependant, en 1778, Brugmans avait annoncé que le bismuth est repoussé par l'aimant; ensuite, Lebaillif, au moyen d'un appareil fort délicat, avait confirmé cette propriété et l'avait retrouvée dans d'autres substances parmi lesquelles on peut citer l'antimoine; mais ces expériences avaient été pour ainsi dire oubliées, parce que les effets toujours très-faibles étaient incertains et souvent contradictoires. Ils devinrent très-nets, en devenant plus intenses, quand M. Faraday reprit la question avec des électro-aimants très-puissants.

Expériences générales. — L'appareil qui sert à ces expériences, et qui est construit par M. Ruhmkorff (*fig.* 607), se

Fig. 607.

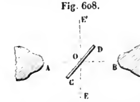


compose d'un banc de fer très-épais D, percé d'une rainure longitudinale, et sur lequel reposent et glissent deux équerres

massives HLH', IFI'; elles peuvent être éloignées ou rapprochées, et on les serre au moyen de deux fortes vis qui sont engagées dans la rainure. A leur sommet, elles sont reliées à deux noyaux de fer doux cylindriques HO, IO, qui occupent les axes de deux bobines A et B et qui sont terminés en O par deux armatures montées à vis auxquelles on donne, suivant les cas, des formes différentes. Toutes les pièces étant en fer, fixées entre elles et très-massives, elles constituent un électro-aimant très-énergique, et quand un courant traverse les deux bobines A et B dans le même sens, il développe deux pôles opposés aux deux armatures O. Ce courant arrive dans le commutateur E, qui a été décrit page 17; il est transmis par la poupée F à la bobine B; il passe de B en A par le fil KK', et il revient au commutateur par LL.

On place entre les deux pôles un support C, destiné à soutenir par un fil de cocon CO un cylindre d'une substance quelconque; on peut faire glisser ce support longitudinalement sur une règle divisée, et, au moyen d'une vis latérale, lui donner un mouvement perpendiculaire. Il est donc possible de placer le milieu O du cylindre suspendu, dans l'axe et à égale distance des deux pôles. Supposons que cette condition soit réalisée, et qu'on ait disposé en O une petite aiguille de fer CD (*fig.* 608), elle s'aimantera longitudinalement, et se placera suivant la ligne axiale AB; si on la remplace par une balle sphérique de fer, elle sera attirée par celui des deux pôles dont elle est le plus rapprochée.

Fig. 608.



Ce n'est pas là du tout ce qui se passe quand on remplace le fer par du bismuth. Un petit barreau horizontal CD se dirige suivant EE', perpendiculairement à la ligne des pôles ou équatorialement, et une petite balle est repoussée par chacun des deux pôles quand on la met en contact avec lui. L'action est d'ailleurs beaucoup moins énergique sur le bismuth qu'elle ne l'était sur le fer.

En étudiant toutes les substances qu'il put se procurer, M. Faraday trouva qu'elles se conduisent toutes, ou comme le fer, avec un degré d'énergie à la vérité beaucoup moindre, ou

comme le bismuth. Les premières sont magnétiques, les secondes ont été nommées *diamagnétiques*, pour rappeler leur position d'équilibre.

I. Les métaux magnétiques sont plus nombreux qu'on ne l'avait pensé; outre ceux que nous avons déjà nommés, il faut citer le cérium, le titane, le palladium, le platine, l'osmium, le lanthane, le molydbène et l'uranium. Les sels de ces métaux sont généralement magnétiques eux-mêmes.

II. Tous les autres métaux sont diamagnétiques. Voici l'ordre dans lequel ils se rangent d'après leur puissance diamagnétique décroissante : Bismuth, antimoine, zinc, étain, cadmium, mercure, plomb, argent, cuivre, or, tungstène.

III. Les métalloïdes sont diamagnétiques, ainsi que leurs composés; ceux qui le sont le plus sont le soufre, le phosphore, le charbon, la cire, le bois et en général les matières organiques.

IV. Pour étudier les liquides, on les enferme dans des tubes de verre très-minces qui n'éprouvent aucune influence sensible. On peut aussi, comme le fait M. Plucker, les disposer en couches très-minces dans un verre de montre, ou sur une carte, entre les pôles A et B, sur des armatures planes et horizontales. S'ils sont magnétiques, ils s'accumulent sur les bords et y forment deux saillies parallèles (*fig*. 609). Quand ils sont



Fig. 609. Fig. 610.

fortement diamagnétiques, on les voit se déprimer, et deux gorges creuses remplacer les deux saillies (*fig*. 610).

On reconnaît par ces divers procédés que l'eau, l'alcool, l'éther, les huiles, les essences, le sulfure de carbone, etc., sont diamagnétiques, tandis que les sels dissous des métaux magnétiques, et surtout ceux de fer, agissent généralement d'une manière inverse.

V. L'action des aimants sur les gaz a été, pour la première fois, mise en évidence par M. Bancalari, au moyen d'une expérience fort belle. Il plaça la flamme d'une bougie un peu au-

dessous des deux pôles entre deux armatures terminées en pointe. Au moment où le courant commença à passer, il la vit se déprimer et se jeter des deux côtés de l'axe. Il faut conclure de là que les gaz qui constituent la flamme sont diamagnétiques à une température élevée, puisqu'ils sont repoussés.

M Faraday, suivant ensuite la même voie, étudia à la température ordinaire divers gaz qu'il dirigeait vers un pôle de l'électro-aimant au moyen d'un tube dans lequel se trouvait un peu d'acide chlorhydrique. Le courant gazeux se déviait par l'action de l'aimant, et en lui opposant un autre petit tube contenant de l'ammoniaque, on trouvait sa nouvelle direction : c'était celle qu'il fallait donner au second tube pour y produire des vapeurs blanches par la réaction de l'acide chlorhydrique sur l'ammoniaque. M. Faraday trouva que l'oxygène est notablement magnétique, que le bioxyde d'azote l'est faiblement, et que tous les autres gaz, mais surtout l'hydrogène, ainsi que le gaz d'éclairage, sont diamagnétiques.

Toutes ces expériences nous montrent que les corps à tous les états physiques peuvent se partager en deux grandes catégories : les uns, qui sont magnétiques, sont attirés par l'aimant et se dirigent suivant l'axe des pôles; les autres sont diamagnétiques, repoussés par chaque pôle, et dirigés équatorialement; et depuis le fer jusqu'au bismuth, on peut classer toutes les substances en une série continue, d'abord celles où la force est attractive et va en décroissant, ensuite celles où elle est nulle, et enfin les corps où l'action est répulsive et augmente.

POLARITÉ DIAMAGNÉTIQUE. — Nous savons pourquoi les corps magnétiques prennent la direction axiale : c'est parce que chacun des pôles de l'aimant fait naître à l'extrémité du barreau qui le regarde, un pôle de nom contraire qu'il attire; mais nous ne savons pas et nous devons chercher quelle est la nature des forces que l'aimant exerce sur ces substances diamagnétiques.

L'idée qui se présente naturellement à l'esprit, est que chacun des pôles de l'électro-aimant, par exemple A (*fig.* 608), développe sur une aiguille diamagnétique CD un pôle de même nom, ou austral, à l'extrémité la plus voisine C, et un autre pôle de nom contraire, ou boréal, à la partie la plus éloignée D. En effet, si cela avait lieu, une balle diamagnétique

approchée de A serait nécessairement repoussée, et quand on placerait une aiguille CD entre les deux pôles, dans la situation indiquée par la figure, C serait repoussé par A et attiré par B, pendant que D serait repoussé par B et attiré par A. L'aiguille viendrait en EE', et dans cette position elle serait en équilibre stable, parce que les actions de A et de B sur chaque extrémité seraient égales et que tout écart de l'aiguille d'un côté ou de l'autre de cette position ferait naître des forces qui l'y ramèneraient.

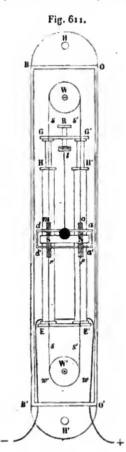
Cette idée a été émise et soutenue par MM. Poggendorff, Weber, Plucker et Reich, mais elle a été combattue par MM. Faraday et Thomson. Nous ne ferons point l'historique de cette question; nous nous contenterons de citer les expériences de M. Tyndall, qui a clos la discussion en démontrant que cette espèce de polarité, inverse de la polarité magnétique, est réelle.

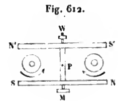
M. Tyndall suspendit d'abord un barreau de bismuth à un fil de soie dans l'axe d'une bobine traversée par un courant; puis approchant un aimant des extrémités de ce barreau, il constata qu'elles se comportaient comme celles d'une aiguille aimantée; mais le pôle austral était à la droite du courant au lieu d'être à la gauche, comme cela aurait lieu si le bismuth était remplacé par du fer. Cette expérience n'était d'ailleurs que la répétition de quelques autres, précédemment faites par MM. Poggendorff et Plucker.

Dans un travail postérieur, il fit usage d'un appareil beaucoup plus complet, dont le plan avait été suggéré par M. Weber, et qui est représenté en coupe verticale et horizontale dans les *fig.* 611 et 612.

BO, B'O' représente le contour d'une caisse en verre fixée à un mur vertical par les vis H et H'; HE, H'E' sont deux hélices enroulées en sens contraire sur des tubes de cuivre fixés à la traverse GG'; *mn*, *op* sont deux cylindres de la matière qu'on veut essayer, ils sont soutenus par un fil sans fin, enroulé sur les poulies W et W', de façon qu'en faisant mouvoir l'une d'elles on élève *mn* et on abaisse *op*, ou inversement. Enfin *ad*, *a'd'* est une boîte en cuivre rouge, dans laquelle se meut un système de deux aimants horizontaux astatiques, suspendus par un fil *t*; ils sont représentés en NS et N'S' dans la *fig.* 612.

Supposons d'abord que les cylindres *mn* et *op* aient été enle-


Fig. 611.


Fig. 612.

vés, et qu'on fasse passer le courant dans les spirales qui sont identiques, les aimants ne doivent point se déplacer. Cela n'était pas exactement réalisé, mais au moyen d'un circuit extérieur convenable on put détruire le peu d'action qui s'exerçait. Après avoir établi cette compensation, on plaça les deux cylindres *mn* et *op*, on fit jouer la poulie W jusqu'à mettre l'extrémité *n* d'une part et l'extrémité *o* de l'autre, en face des deux aimants NS, N'S'; toutes deux devinrent des pôles de même nom, qui attiraient N, N' ou S, S', et faisaient dévier le

système des deux aimants dans un sens qui changeait avec la nature du magnétisme qu'elles avaient reçu. On mesurait la déviation par la réflexion d'une mire sur le miroir M.

On commença par placer dans l'appareil des cylindres faiblement magnétiques, et l'on constata que leur aimantation se faisait dans le sens prévu, puis on les remplaça par des barreaux diamagnétiques, et l'on constata une déviation opposée, ce qui prouve une polarité inverse. M. Tyndall opéra non-seulement sur le bismuth et l'antimoine, mais encore avec des substances liquides ou solides non conductrices; le résultat fut le même, et la grandeur de la déviation fut sensiblement proportionnelle à l'intensité du diamagnétisme des substances employées.

On sait donc maintenant à quelle cause il faut attribuer le diamagnétisme; il ne nous reste plus qu'à déterminer les lois de l'intensité des actions exercées par un aimant sur diverses substances.

INFLUENCE DU MILIEU AMBIANT. — M. Faraday reconnut, dès ses premières recherches, que la nature du milieu ambiant peut changer complétement les propriétés des corps. Prenons comme exemple une solution peu concentrée de sulfate de fer enfermée dans un tube de verre : elle est magnétique dans l'air et le devient plus énergiquement si le tube est plongé dans une cuve pleine d'eau ou d'alcool. Mais quand on le suspend dans une solution du même sel que celui qu'il contient, il est magnétique, indifférent ou diamagnétique si le degré de concentration du liquide intérieur est supérieur, égal ou inférieur à celui de la solution dans laquelle il plonge.

Par une action analogue, le tube, quand il contient une substance diamagnétique, est repoussé, en équilibre, ou attiré, suivant qu'il est plongé dans un milieu magnétique, ou dans la solution qu'il contient, ou dans un liquide plus diamagnétique qu'elle.

Voici comment M. Ed. Becquerel formule ces changements de propriétés. Si nous plaçons dans le voisinage d'un pôle d'aimant une cuve fixe pleine d'un liquide, celui-ci n'éprouve aucun mouvement. Isolons par la pensée une masse quelconque dans son intérieur, elle est sollicitée, suivant qu'elle est ma-

gnétique ou diamagnétique, par une force f, positive ou négative; et comme elle ne se déplace pas, il faut que le milieu qui l'entoure exerce sur elle une poussée $-f$ égale et contraire; cela veut dire que le principe d'Archimède s'applique à ces forces comme à la pesanteur. Remplaçons maintenant cette masse que nous avons isolée par une autre qui soit limitée à la même surface, mais qui soit de nature différente, elle éprouvera, de la part de l'aimant, une action différente f' positive ou négative, et de la part du liquide une même poussée $-f$, la résultante sera $f'-f$. Par conséquent l'action que le pôle d'un aimant exerce sur un corps quelconque plongé dans un milieu fluide, est égale à la différence de celles qu'il exercerait séparément sur ce corps et sur le fluide déplacé. De là résultent quelques conséquences.

1°. Quand le milieu est magnétique, f est positive, et $f'-f$ tend à être négative; par conséquent, un corps quelconque tend à devenir diamagnétique dans un milieu magnétique. Inversement, dans un milieu diamagnétique, f est négative, $-f$ est positive; la substance tend à être magnétique si elle ne l'était pas, et le devient davantage si elle l'était déjà.

L'air est magnétique, donc il tendra à rendre diamagnétiques les corps qu'on y observe.

2°. Si, après avoir corrigé de la poussée du gaz les actions observées dans l'atmosphère, on trouvait que toutes les substances deviennent magnétiques ou indifférentes dans le vide, le diamagnétisme ne serait qu'une manifestation accidentelle de la propriété générale du magnétisme, tel qu'on l'observe dans le fer: il serait produit par la réaction des milieux. Mais comme cela n'est pas, il faut, ou bien que le diamagnétisme soit une propriété spéciale appartenant à certains corps, ou bien que le vide lui-même soit un milieu magnétique comme l'air, et capable par sa réaction d'exercer sur les corps une pression mesurable. La plupart des physiciens ont adopté la première manière de voir, MM. Becquerel père et fils ont soutenu la seconde.

3°. Si l'on admet que des corps peuvent s'aimanter diamagnétiquement, la théorie d'Ampère n'est plus générale, et l'on ne voit pas comment les courants d'une hélice magnétisante peuvent, dans les expériences de M. Tyndall, aimanter

un barreau de bismuth dans un sens contraire à l'aimantation que prend une aiguille de fer placée dans les mêmes conditions. A la vérité, on a fait quelques tentatives pour adapter cette théorie à ces nouveaux phénomènes, mais sans y réussir complétement; et l'on est forcé de ne plus voir dans l'hypothèse d'Ampère qu'une théorie incomplète, et dans le diamagnétisme qu'un fait inexpliqué. Il n'en serait pas de même si l'on adoptait les idées de MM. Becquerel: tous les corps seraient magnétiques, et il n'y aurait aucune rectriction à apporter à la théorie de l'aimantation par les courants. Mais sans nous engager dans ces discussions, nous allons continuer expérimentalement l'étude des faits.

INFLUENCE DE LA STRUCTURE. — M. Faraday eut l'occasion de remarquer que des morceaux de bismuth cristallisé ne prennent pas toujours une position équatoriale entre les deux pôles. Depuis lors M. Plucker, étudiant divers cristaux, reconnut que la direction d'équilibre est plus souvent déterminée par celle de l'axe cristallographique que par la forme des morceaux étudiés. Cette étude paraissait devoir être très-complexe; elle est devenue très-simple, grâce à MM. Tyndall et Knoblauch.

1°. Ils préparèrent d'abord un disque plat avec de la pâte de farine, et y ayant planté normalement des fils de fer, ils le suspendirent par un point de son contour entre les pôles d'un électro-aimant. Il est évident que chacun des fils se plaçant axialement, le disque devait prendre la position équatoriale. En remplaçant le fer par du bismuth, l'inverse se présenta. Cette expérience simple n'avait d'autre but que de faire voir comment la structure d'un corps influe sur la direction qu'il prend, aussi bien que sa forme.

2°. MM. Tyndall et Knoblauch prirent ensuite du carbonate de fer en poudre, et l'ayant mêlé à de la gomme, pour lui donner de l'adhérence, ils le comprimèrent fortement entre deux plaques de fer; il prit la forme d'un disque peu épais, mais assez large, et il se plaça équatorialement. Cela prouve que si les molécules sont plus rapprochées dans un sens que dans un autre, elles agissent dans la direction du plus grand rapprochement, comme les fils de fer dans l'expérience précédente.

Cette direction peut être appelée *ligne de polarité élective*. En répétant l'expérience avec de la poudre de bismuth, on vit la ligne du plus grand tassement se placer équatorialement, et le disque axialement.

3°. On passa de là à une troisième expérience, qui trouvera bientôt son application. On superposa des disques de papier recouvert d'émeri ferrifère qui est magnétique, de manière à former une pile très-longue de petit diamètre. Chaque disque se dirigeait axialement, et l'axe du cylindre équatorialement. Une pile de papier couvert de bismuth agissait d'une manière opposée.

De là on conclut généralement que si un cristal est formé par des lames superposées et clivables dans une seule direction, il se conduira comme la pile de papier d'émeri s'il est magnétique, et comme celle de papier de bismuth s'il est diamagnétique : c'est en effet ce qui fut vérifié avec le sulfate de nickel et le béryl, qui sont magnétiques, avec les sulfates de magnésie et de zinc, ainsi qu'avec le salpêtre et la topaze, qui sont diamagnétiques.

4°. Quand il y aura deux clivages également aisés, la ligne de polarité élective devant être à la fois parallèle aux deux directions des lames, se confondra avec leur intersection : ce qui est vrai.

5°. S'il y en a trois qui soient perpendiculaires, comme dans le sel gemme, ou s'il n'y en a point, comme dans le quartz, il n'y aura point de ligne de polarité élective, et le corps se comportera comme n'étant point cristallisé.

6°. Enfin lorsque les trois clivages ne seront point perpendiculaires, il y aura généralement une direction de plus grande compression, qui se trouve dans le spath parallèle à l'axe de cristallisation : elle se place axialement si le cristal est magnétique, et équatorialement s'il est diamagnétique; c'est ce qui se présente en effet.

MESURE DES FORCES MAGNÉTIQUES. — Il ne reste plus maintenant qu'à comparer entre eux les divers corps, c'est-à-dire à chercher le rapport des intensités des forces attractives ou répulsives qu'ils éprouvent quand ils sont soumis à un même aimant dans des positions et avec des volumes identiques. Ces

mesures ont été faites par M. Faraday, par M. Plucker, et par M. Ed. Becquerel; nous ne rapporterons que le travail de ce dernier savant.

Entre les pôles d'un gros électro-aimant à branches verticales, M. Becquerel avait installé une petite balance de torsion, disposée comme celle de Coulomb; il y suspendait, par un fil d'argent très-fin, des cylindres de même volume et de même forme, façonnés avec les substances qu'il voulait essayer. Il commençait par les amener à une direction d'équilibre toujours la même, qu'il observait avec un microscope et qui faisait un angle déterminé avec l'axe des deux pôles; il aimantait ensuite l'électro-aimant par un courant, alors le cylindre était attiré ou repoussé; mais il le ramenait à sa position première en tordant le fil : l'angle de torsion A mesurait le couple magnétique exercé sur chaque cylindre.

Si le courant avait toujours la même intensité, il suffirait de prendre les rapports des torsions observées avec deux cylindres pour avoir celui de leur pouvoir magnétique ou diamagnétique à volume égal; mais ce courant changeant d'un moment à l'autre, on mesurait son intensité i par une boussole des tangentes, en même temps que l'angle de torsion A par la balance.

Or, d'une part, la force de l'électro-aimant et, d'un autre côté, le magnétisme développé dans le cylindre suspendu, sont proportionnels à i; donc la force attractive doit être en raison directe du carré i^2, et $\frac{A}{i^2}$ représente la torsion qu'on aurait, si l'intensité du courant était toujours la même et égale à l'unité. M. Ed. Becquerel vérifia l'exactitude de ce principe, en prouvant que $\frac{A}{i^2}$ est une quantité constante pour un même cylindre.

On pourrait opérer de la même manière pour les liquides, en les enfermant tous dans des tubes égaux aux cylindres solides qu'on vient d'étudier; cela présenterait quelques difficultés, et M. Ed. Becquerel opéra tout autrement. Supposons qu'on ait d'abord observé dans l'air un cylindre de verre, l'action F qu'on a mesurée est la différence entre celle qui aurait eu lieu dans le vide, que nous représenterons par f_{verre}, et celle qui

agit sur un égal volume d'air, ou f_{air}; on a donc

$$F = f_{verre} - f_{air}.$$

Sans changer ni le cylindre de verre, ni sa position, plongeons-le maintenant dans une cuve pleine d'eau et répétons la mesure : la force de torsion deviendra F', et l'on aura, comme précédemment, en remplaçant l'air par l'eau,

$$F' = f_{verre} - f_{eau};$$

d'où, en retranchant les deux équations,

$$F - F' = f_{eau} - f_{air},$$

ce qui donnera le même résultat que si on avait mesuré dans l'air la répulsion d'un cylindre d'eau dont le volume serait égal à celui du cylindre de verre. Cette méthode permet de comparer très-exactement les mêmes volumes extérieurs des solides et de tous les liquides qu'on veut étudier.

Après avoir fait de nombreuses mesures, dans lesquelles il a plusieurs fois changé le volume des cylindres, M. Ed. Becquerel à réuni ses déterminations dans le tableau suivant. L'eau est prise comme terme de comparaison : son pouvoir diamagnétique est représenté conventionnellement par — 10.

Quand les substances sont magnétiques, elles ont le signe +; si elles sont diamagnétiques, elles sont marquées du signe —.

Forces magnétiques.

SOLIDES.		LIQUIDES.	DENSITÉ.	
Eau............	— 10,00	Eau................	»	— 10,00
Zinc...........	— 2,5	Sulfure de carbone...	»	— 13,30
Cire blanche....	— 5,68	Alcool.............	»	— 7,89
Soufre pur....	— 11,37	Chlorure de sodium..	(1,208)	— 11,28
Plomb d'œuvre..	— 15,28	Sulfate de cuivre....	(1,126)	+ 8,14
Phosphore......	— 16,39	Sulfate de nickel....	(1,082)	+ 21,60
Sélénium.......	— 16,52	Sulfate de fer.......	(1,192)	+ 211,16
Bismuth........	— 217,6	Sulfate de fer.......	(1,172)	+ 180,22
		Protochlorure de fer.	(1,069)	+ 91,93
		Protochlorure de fer.	(1,276)	+ 360,70
		Protochl. concentré..	(1,433)	+ 558,13

Les nombres de ce tableau donnent les valeurs relatives des

forces attractives ou répulsives pour des volumes égaux ; comme elles sont évidemment proportionnelles à la masse, on obtiendrait leurs valeurs à poids égal, en les divisant par la densité des corps.

On voit que le chlorure de fer saturé est le plus magnétique des liquides, mais il l'est beaucoup moins que le fer métallique. Pour comparer ces deux corps entre eux, M. Ed. Becquerel a préparé deux tubes égaux : il a rempli l'un de chlorure, l'autre d'un mélange de cire et de limaille, c'est-à-dire de fer dont la densité avait été réduite dans une proportion connue. Il a cherché ensuite le rapport des actions exercées sur ces tubes par l'électro-aimant, et il en a conclu celui qu'on obtiendrait si le fer avait sa densité ordinaire. Voici les résultats de la comparaison :

	POUVOIR MAGNÉTIQUE	
	A VOLUME ÉGAL.	A POIDS ÉGAL.
Fer.	+ 1000000	+ 1000000
Protochlorure de fer...	+ 25	+ 140
Eau.	− 0,4	− 3

On voit ainsi combien les forces diamagnétiques sont faibles, en comparaison de la force magnétique du fer.

M. Ed. Becquerel appliqua les mêmes méthodes aux gaz; il remplaça la cage de la balance de torsion par une éprouvette où il pouvait faire le vide, et il y suspendit un tube de verre dans lequel il avait mis assez de cire pour détruire à peu près complétement toute action de l'aimant; ensuite il mesura l'action dans le vide et dans les gaz. L'oxygène et l'air seuls lui donnèrent des résultats marqués et se montrèrent magnétiques. On a, comme précédemment :

$$F = f_{\text{verre}} - f_{\text{vide}},$$
$$F' = f_{\text{verre}} - f_{\text{oxygène}},$$
$$F'' = f_{\text{verre}} - f_{\text{air}},$$
$$F''' = f_{\text{verre}} - f_{\text{eau}}.$$

F, F', F'', F''', ayant été déterminées, on trouve, en retran-

chant,

$$f_{oxygène} - f_{vide} = F - F' = +1,733,$$
$$f_{air} - f_{vide} = F - F'' = +0,32,$$
$$f_{eau} - f_{vide} = F - F''' = -9,68,$$
$$f_{eau} - f_{air} = F'' - F''' = -10.$$

On voit que l'oxygène est environ 5 fois plus magnétique que l'air, ce qui prouve que l'azote est indifférent. Connaissant maintenant le pouvoir magnétique de l'oxygène, on peut corriger tous les nombres précédents qui ont été obtenus dans l'air de l'effet de ce gaz et calculer les rapports des pouvoirs magnétiques des diverses substances à poids égaux et dans le vide : on trouve, en prenant le fer comme terme de comparaison,

Fer.................	+1000000
Perchlorure de fer....	+140
Eau.................	− 9,68
Oxygène...........	+377
Air.................	+ 88

D'après cela, on trouve que 1 mètre cube d'oxygène équivaut à 54 centigrammes de fer, et que l'atmosphère tout entière agit comme une couche de fer qui envelopperait la terre et aurait $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur.

Nous terminons par quelques nombres trouvés par MM. Plucker et Faraday.

Magnétisme spécifique à poids égal.

D'APRÈS M. PLUCKER.

CORPS MAGNÉTIQUES.		CORPS DIAMAGNÉTIQUES.	
Fer	100000	Eau	100
Aimant	40000	Phosphore	100
Ocre rouge	134	Sulfure de carbure	102
Fer oligiste	533	Acide chlorhydrique	102
Fer oxydé hydraté	156	Éther sulfurique	127
Sanguine artificielle	151	Essence de térébenthine	223
Sulfate de fer sec	111	Fleur de soufre	71
Solutions saturées d'azotate de fer	34	Sel de cuisine	79
Solutions saturées de chlorhydrate de fer	98	Acide nitrique	48
Solutions saturées de sulfate	58	Azotate de bismuth	35
Solutions saturées de chlorhydrate de potasse	85	Acide sulfurique	34
Protoxyde de nickel	35	Mercure	23
Hydrate de protoxyde de nickel	106		
Azotate de protoxyde de nickel	65		
Sulfate de protoxyde de nickel	100		
Hydrate d'ox. manganique	70		
Oxyde manganeux	167		

D'APRÈS M. FARADAY. (A VOLUME ÉGAL.)

Protoammoniure de cuivre	+ 134,83	Alcool absolu	— 78,70
Perammoniure de cuivre	+ 119,83	Essence de citron	— 80,00
Oxygène	+ 17,50	Camphre	— 82,50
Air	+ 3,40	Camphre	— 82,96
Gaz oléfiant	+ 0,60	Huile de lin	— 85,50
Azote	+ 0,30	Huile d'olives	— 85,60
Vide	0,00	Cire	— 86,73
Acide carbonique	0,00	Acide azotique	— 87,96
Hydrogène	— 0,10	Eau	— 96,60
Gaz ammoniac	— 0,50	Sulfure de carbone	— 99,64
Cyanogène	— 0,90	Acide sulfurique	— 104,47
Verre	— 18,20	Soufre	— 118,00
Zinc pur	— 74,60	Borate de plomb	— 136,60
Éther	— 75,30	Phosphore	»
		Bismuth	— 1967,60

SOIXANTE-TREIZIÈME LEÇON.

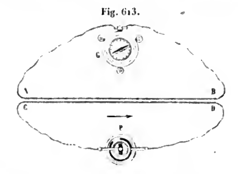
DE L'INDUCTION.

I. Induction par les courants parallèles. — II. Induction par les bobines et les aimants. — Loi de Lenz. — III. Induction par la terre. — IV. Induction d'un courant sur lui-même. — Quantités et tensions des courants induits. — V. Courants induits de divers ordres. — VI. Induction par l'électricité statique. — Influence des diaphragmes.

M. Faraday a découvert qu'un courant qui s'établit ou qui cesse de passer dans un conducteur quelconque, développe par influence, dans tout circuit fermé, voisin et à l'état naturel, des courants qu'il a nommés *courants d'induction* ou *courants induits*. Nous allons étudier les lois de leur production.

I. **INDUCTION PAR LES COURANTS PARALLÈLES.** — Examinons d'abord (*fig.* 613) le cas très-simple où l'on fait agir un courant $\overrightarrow{CD}$, rectiligne, très-long et engendré par un élément P, sur un circuit parallèle voisin AB, fermé par un galvanomètre G.

Fig. 613.



1°. Quand on rapproche vivement les deux circuits, on voit le galvanomètre accuser un courant d'induction $\overleftarrow{AB}$ qui circule

à travers le fil induit dans un sens opposé à $\underset{\longrightarrow}{CD}$; nous le nommerons *courant commençant* ou *inverse*.

Aussitôt que le mouvement de rapprochement est terminé, l'aiguille aimantée revient au zéro et y demeure pendant tout le temps que les deux circuits conservent leur même position relative.

Si l'on vient ensuite à éloigner les deux fils, un nouveau courant d'induction se montre dans le circuit ABG; mais cette fois il va de A en B ($\longrightarrow$), dans le même sens que $\underset{\longrightarrow}{CD}$: c'est le courant *finissant* ou *direct*. Il cesse, comme le précédent, avec le mouvement qui l'a déterminé.

Si l'on divise le mouvement total de rapprochement ou d'éloignement en ses déplacements infiniment petits ds pendant chaque intervalle dt, nous admettrons que chaque mouvement ds produit un courant d'induction d'autant plus intense que ds est plus grand, qui est en retard sur le déplacement d'une certaine durée constante nécessaire pour que la réaction s'établisse et qui persiste pendant un temps inconnu, mais probablement plus grand que dt. Si ces hypothèses, que nous développerons dans la suite, sont fondées, le courant d'induction total qui résulte d'un mouvement fini doit être considéré comme formé par des courants élémentaires, qui sont en retard d'une durée constante sur les déplacements ds, qui naissent l'un après l'autre après des intervalles dt, et qui se superposent en partie, parce qu'ils durent plus que dt. Ce courant total offrira donc trois périodes, la première d'accroissement, la deuxième d'état, la troisième de décroissement, et il sera d'autant plus intense pendant sa période moyenne que chacun des déplacements élémentaires ds aura été plus grand, c'est-à-dire que le mouvement total aura été plus grand et qu'il aura moins duré : c'est en effet ce qu'on observe.

2°. Nous allons maintenant laisser les fils dans une position relative invariable, et nous ferons changer l'intensité du courant CD.

Si elle augmente, elle développe un courant $\underset{\longleftarrow}{AB}$ inverse de $\underset{\longrightarrow}{CD}$, comme si la distance des fils diminuait.

Si elle reste constante, elle ne produit aucune action.

Si elle diminue, elle fait naître un courant $\underset{\longrightarrow}{\text{AB}}$, direct et parallèle à $\underset{\longrightarrow}{\text{CD}}$, comme si la distance augmentait.

L'intensité du courant qu'on observe est d'autant plus grande que la variation d'intensité est plus considérable et qu'elle dure moins de temps.

3°. On peut, au moyen d'un interrupteur, fermer et ensuite ouvrir le circuit CD. La fermeture de ce circuit équivaut à un rapprochement instantané et maximum des fils, depuis l'infini jusqu'à la distance à laquelle ils se trouvent, ou à une augmentation subite et maximum de l'intensité CD, depuis zéro jusqu'à sa valeur finale i; elle produit donc un courant induit inverse $\underset{\longleftarrow}{\text{AB}}$, dont l'intensité est la plus grande de celles qu'il peut avoir. Quand on ouvrira le circuit, on obtiendra le même effet qu'en éloignant les fils instantanément jusqu'à l'infini, ou en diminuant subitement jusqu'à zéro l'intensité de CD; par conséquent, on développera un courant direct très-court et maximum $\underset{\longrightarrow}{\text{AB}}$.

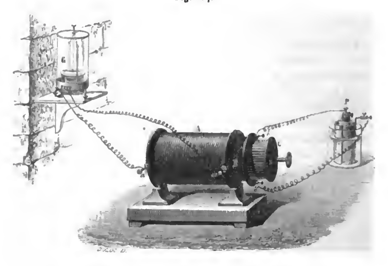
Ces lois sont générales et se résument ainsi : « Il y a un courant inverse dans le circuit induit, quand le courant inducteur s'approche, augmente ou s'établit. Il y a courant direct par les actions contraires, c'est-à-dire quand le courant inducteur s'éloigne, diminue ou s'annule. L'intensité moyenne de chaque courant induit augmente quand le déplacement ou la variation d'intensité croissent en grandeur et diminuent en durée. »

Il nous reste à énumérer les diverses méthodes expérimentales qui permettent de produire aisément des courants d'induction très-intenses.

II. **INDUCTION PAR LES BOBINES ET LES AIMANTS.** — La *fig.* 614 représente : 1° une bobine A composée d'un fil isolé très-fin, faisant un grand nombre de tours sur un cylindre de carton et dont les extrémités a, a' sont réunies par un galvanomètre G : c'est le circuit induit; 2° une seconde bobine B parallèle à la première dans laquelle on peut l'introduire; elle est formée par

un fil plus gros et moins long, dont on met les extrémités *b* et


Fig. 614.



b' en relation avec une pile P : c'est la bobine inductrice ; 3° un noyau central C qui entre dans la bobine B, comme B entre dans A, et qui est constitué par un faisceau de cylindres en fer doux parallèles à l'axe.

1°. On enlève le noyau ; alors on a en présence deux circuits composés chacun de fils circulaires parallèles et très-voisins, et il est évident qu'ils agiront l'un sur l'autre comme des fils parallèles et rectilignes ; mais ils agiront avec plus d'intensité, parce qu'ils sont plus longs et que l'effet est multiplié par le nombre des tours. 1° Si l'on éloigne brusquement la bobine B, on obtient dans A un courant direct très-court ; si l'on approche B et qu'on l'introduise dans A, elle y développe le courant inverse. 2° On produit l'induction par variation d'intensité, en intercalant ou en supprimant brusquement une résistance additionnelle dans le circuit de la pile P au moyen d'un commutateur ou d'un rhéostat. 3° Enfin on développe dans la bobine induite des courants directs ou inverses par la troisième méthode, en annulant ou en établissant brusquement le courant inducteur au moyen d'un interrupteur. Cet appareil permet donc de vérifier toutes les lois de l'induction

produite par déplacement, par variation d'intensité et par cessation ou établissement du courant.

2°. Une bobine est un solénoïde, et un solénoïde n'est rien autre chose qu'un aimant; on peut donc remplacer le circuit inducteur B par un barreau aimanté. Quand on introduit celui-ci dans la bobine A, il y développe un courant inverse qui a le pôle austral à sa droite; si l'on retire l'aimant, l'induction finissante est directe, et le courant qui naît est parallèle à ceux de l'aimant dont il a le pôle austral à sa gauche.

3°. La bobine B, traversée par le courant de la pile, ayant été placée dans A, et le galvanomètre étant revenu au zéro, on introduit le noyau C: le fer doux s'aimante et produit une induction commençante ou inverse. En retirant ce noyau, on voit un courant direct se développer avec une très-grande intensité.

4°. La dernière expérience prouve que la bobine B développe d'abord l'induction qui lui appartient en propre, qu'ensuite elle aimante le fer doux, lequel à son tour induit la bobine A. Ces deux effets s'ajoutent quand B et C sont solidaires et qu'on fait varier la distance ou l'intensité du courant inducteur B. La plus grande induction que l'on puisse obtenir aura lieu quand on fera agir sur A une bobine inductrice B enveloppant un fer doux C, et qu'on ouvrira ou qu'on fermera le circuit inducteur.

LOI DE LENZ. — En étudiant l'induction produite par déplacement, nous nous sommes contentés d'éloigner ou de rapprocher deux circuits dont les éléments les plus voisins restent parallèles; il faut maintenant généraliser ce cas trop restreint, et chercher ce qui arriverait entre un courant et un circuit fermé quelconques, auxquels on donnerait un déplacement relatif quelconque. Pour cela, remarquons d'abord qu'au moment où nous avons *rapproché* les deux bobines précédentes, les deux courants inducteur et induit étaient contraires; par conséquent ils se repoussaient et tendaient à *s'éloigner*. De même, en *éloignant* les deux circuits, les deux courants étaient parallèles, s'attiraient et tendaient à se *rapprocher*. On voit donc que l'action mécanique exercée par le courant induit sur le courant inducteur a pour effet de donner au premier un mouvement opposé à celui qui l'a fait naître. M. Lenz a fait la même remarque pour un grand nombre de cas diffé-

rents, et il a été conduit à formuler la loi suivante : « Toutes les fois qu'on produit un déplacement relatif entre un courant et un circuit fermé à l'état naturel, celui-ci est traversé par un courant d'induction qui réagit pour déterminer un mouvement inverse, ou, ce qui est la même chose, qui est inverse de celui qui produirait le même déplacement. »

Prise dans sa plus grande généralité, la loi de M. Lenz conduit aux corollaires suivants :

1°. Si un courant fixe imprime un mouvement quelconque à un autre qui est mobile, il se développe dans les deux conducteurs, par suite de leur déplacement, des courants induits opposés qui diminuent l'intensité des courants primitifs. L'effet du mouvement produit est donc le même que celui d'une résistance qu'on introduirait dans les conducteurs ou que celui d'une force électromotrice qui serait de signe contraire à celle de la pile employée.

2°. Si un premier courant qui parcourt un conducteur mobile, prend un mouvement de rotation continue sous l'action d'un second courant qui est fixe, on développera dans la partie mobile un courant d'induction continu opposé au premier, en lui imprimant mécaniquement le même mouvement : c'est ce qui arrivera dans le conducteur horizontal OA (*fig.* 570, p. 218) si on lui donne un mouvement de rotation autour de O en présence d'un courant circulaire MM'M".

3°. Un conducteur soumis à des conditions déterminées de déplacement n'éprouve aucune induction quand on le fait mouvoir devant un courant fixe par rapport auquel il est astatique.

Exemples. — Un conducteur CD, qui se meut perpendiculairement à sa direction devant un courant indéfini XY, qui le coupe en deux parties égales (*fig.* 615).

Fig. 615.

Fig. 616.

Un conducteur circulaire A*m*B*n* mobile autour d'un axe vertical OO′, devant un courant également circulaire et parallèle CD dont le centre est sur OO′ (*fig.* 616), ou un solénoïde MN mobile autour de son axe AB sur lequel est placé un autre solénoïde fixe ou un aimant AB (*fig.* 617).

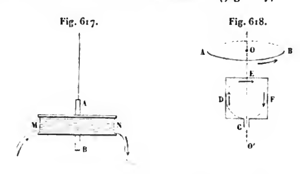


Fig. 617. Fig. 618.

Un conducteur rectangulaire ou circulaire CDEF vertical et tournant autour de l'axe OO′ qui passe par son centre, devant un courant circulaire horizontal AB, ou devant un solénoïde, dont l'axe coïncide avec OO′ (*fig.* 618).

4°. Il arrive souvent qu'un circuit fermé mobile autour d'un axe et traversé par un courant, se fixe devant un système de courants ou d'aimants invariables dans une position déterminée, et qu'il se retourne de 180 degrés quand le sens de l'un des mouvements électriques change. C'est ce qui arrive pour un solénoïde CD en présence d'un aimant CD (*fig.* 619).

Supposons maintenant que le circuit mobile soit à l'état naturel et qu'on l'éloigne de la première position d'équilibre, il sera traversé par un courant induit qui l'y ramènerait. Si ensuite on le rapproche de la première position en l'éloignant de la seconde, on obtiendra un courant d'induction inverse du précédent. Il suit de là qu'en faisant tourner continûment ce circuit autour de son axe, il s'éloignera d'abord de la première position pour venir se confondre avec la seconde, puis il s'éloignera de celle-ci pour revenir à la première : par conséquent, le sens du courant changera à chaque demi-révolution au moment où le circuit passera par l'une ou l'autre de ses positions d'équilibre.

Exemples. — Un solénoïde CD (*fig.* 619) qui est à l'état naturel, qui est fermé et qui tourne autour de O dans le sens indiqué par les flèches, en présence d'un aimant ou d'un solénoïde AB, engendre, pendant la première demi-révolution, des courants parallèles à ceux de AB, et des courants inverses pendant la seconde.

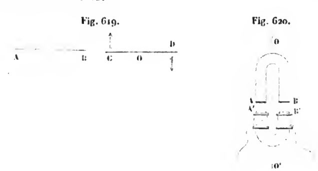


Fig. 619. Fig. 620.

La même chose a lieu quand une spirale A'B' recourbée en U est mobile autour de OO' (*fig.* 620), devant un aimant en fer à cheval AB. Si cette spirale enveloppe un noyau de fer doux, l'aimantation qui se produit par le rapprochement ou l'éloignement, ajoute son effet à l'action des pôles A et B, et les courants qu'on obtient sont plus intenses. C'est sur ce principe que sont fondées les machines de Pixii et de Clarke, que nous étudierons dans la suite.

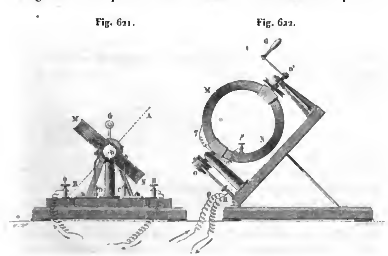
Un courant $AmBn$ (*fig.* 616), mobile autour d'un axe AB, devant un courant circulaire CD, ou devant un aimant dont l'axe est vertical, se place parallèlement à CD; donc le circuit $AmBn$, quand il sera à l'état naturel et qu'il tournera autour de AB, sera traversé par des courants d'induction, qui changeront de sens toutes les fois qu'il passera par le plan parallèle à CD. Ce dernier exemple va nous permettre de produire des courants d'induction par le magnétisme terrestre.

III. **INDUCTION PAR L'ACTION DE LA TERRE.** — Pour produire ces courants, on peut employer l'appareil représenté (*fig.* 621 et 622) : il se compose d'un cadre MN sur lequel est enroulée une spirale de fils de cuivre, et qu'on fait tourner par une manivelle autour d'un axe OO'. On peut placer cet axe horizon-

talement, ou l'incliner par le moyen d'une charnière fixée à la base de l'appareil. Les deux extrémités *p* et *q* du fil aboutissent à un commutateur O (*fig.* 621) et deux languettes D*d*, C*c* pressent sur le contour de O. Si un courant de direction constante arrivait par QD*d* et sortait par *c*CH, il traverserait la spirale MN et changerait de sens à chaque demi-révolution; inversement, si un courant traversant MN change de sens à chaque demi-tour que fait l'axe, il prendra une direction constante dans le fil qui réunit les languettes, pourvu que celles-ci franchissent la ligne d'interruption du commutateur au moment précis où le sens du courant change dans MN.

Cela posé, plaçons l'axe OO′ horizontalement de l'est à l'ouest (*fig.* 621). Si MN était traversé par un courant, il se mettrait en équilibre sous l'influence de la terre, quand son plan serait perpendiculaire à la direction AB de l'aiguille d'inclinaison; par conséquent, si le circuit MN est à l'état naturel, il sera traversé par des courants induits quand on le fera tourner; ils changeront de sens à chaque demi-révolution quand MN traversera le plan perpendiculaire à AB, et si, à ce moment, la ligne d'interruption du commutateur coïncide avec les points

Fig. 621. Fig. 622.



de contact des deux languettes, il y aura une succession de courants de direction constante dans le fil qui réunit les pou-

pées Q et H, et un galvanomètre placé dans ce fil éprouvera une déviation permanente. C'est ce que l'expérience montre.

Mais si l'on incline l'axe OO' et qu'on le mette parallèlement à l'aiguille d'inclinaison (*fig.* 622), MN sera un circuit astatique par rapport à la terre, et quand on le fera tourner on ne développera aucun courant induit : ce dont il est facile de s'assurer.

IV. **INDUCTION D'UN COURANT SUR LUI-MÊME.** — Quand, après avoir mis en contact les deux rhéophores d'une pile, on vient à les écarter l'un de l'autre, on voit apparaître entre eux, au moment même où on les sépare, une étincelle de rupture. Elle est faible et presque insensible, quand même le courant serait très-fort, si le circuit extérieur est formé par un fil court; mais elle devient grande, vive et bruyante, quand le fil est long, et surtout quand il est enroulé sur des bobines et qu'il y forme des tours nombreux et rapprochés. Dans ce cas, lorsqu'on tient dans chaque main les bouts des deux rhéophores, on reçoit une commotion très-forte au moment de la rupture. Il faut donc conclure que le courant qui a traversé des bobines éprouve, quand on l'interrompt, un renforcement subit qui lui permet de franchir sous forme d'étincelle la distance très-petite qui sépare les deux rhéophores qu'on sépare, ou les muscles du corps humain. C'est un effet d'induction qui a été découvert presque à la même époque par plusieurs physiciens, et dont M. Faraday a donné l'explication suivante :

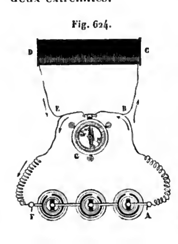
Considérons en particulier deux des tours que le fil conducteur fait sur une bobine et supposons qu'ils soient très-rapprochés. Au moment où le courant s'établira dans l'un d'eux, il réagira sur le voisin et y développera un deuxième courant, induit, inverse, qui diminuera l'intensité du premier, puisqu'il marche dans le même circuit. Donc le courant total commence par être très-faible, puis il croît progressivement comme les ordonnées d'une courbe AB (*fig.* 623); ensuite il prend une intensité constante de B en C, et tant qu'il la conserve, il n'y a plus d'induction. Mais si l'on vient à rompre le circuit, chaque spire agit sur ses voisines pour y faire naître un courant induit direct qui s'ajoute au courant principal, et la somme de tous les deux produit un renforcement final CDE

assez intense pour franchir la couche d'air interposée alors entre les conducteurs qu'on sépare : c'est ce qui produit une étincelle de rupture d'autant plus forte que le nombre des spires est plus grand, et c'est ce qu'on nomme l'*extra-courant*. Il y a donc, en résumé, trois périodes successives à considérer : la première d'établissement, pendant laquelle l'intensité croît comme si la résistance diminuait; la deuxième d'état permanent; la troisième finale, caractérisée par une brusque augmentation d'intensité, comme si la force électromotrice croissait.

Fig. 623.

Supposons que les deux bouts du conducteur, au lieu d'être isolés, soient tenus dans les deux mains ou réunis par un conducteur très-résistant. Au moment où, après les avoir laissés en contact pendant quelque temps, on vient à les éloigner l'un de l'autre, le courant principal éprouve un grand affaiblissement, puisqu'une résistance très-grande lui est opposée tout à coup; alors l'induction finissante agit pour produire le renforcement CDE; mais au lieu d'éclater dans l'air il se partage en deux courants dérivés, l'un qui donne une étincelle faible ou nulle, l'autre qui parcourt ou le corps humain qu'il ébranle, ou le conducteur résistant qui réunit les deux extrémités.

Fig. 624.



M. Faraday a justifié son explication par les expériences suivantes. Le courant d'une pile AF se divise en deux autres qui traversent, le premier une bobine CD (*fig.* 624), le second un galvanomètre G, dont l'aiguille mn se dévie d'une quantité stable jusqu'en $m'n'$. 1° Plaçons contre cette aiguille en m' un arrêt qui l'empêche de revenir au zéro et rompons le circuit en A; puis, au bout d'un certain temps, rétablissons la communication. Dans la

première période d'établissement du courant, les choses se passent comme si la résistance de CD était d'abord très-grande et allait ensuite en diminuant; donc le courant dérivé qui traverse G doit être plus grand que dans la période d'état et l'aiguille doit être chassée au delà de $m'n'$, ce qui a lieu en effet.

2° Arrêtons au contraire l'aiguille en mn, au zéro, par un obstacle qui s'oppose à sa déviation vers $m'n'$. Quand le courant passera, elle sera pressée sur cet obstacle; quand il sera interrompu en A, le courant dérivé ABEF cessera; mais l'extra-courant de la bobine traversera le circuit fermé BCDEG et passera dans le galvanomètre de E en B, en sens inverse du courant dérivé qui chassait l'aiguille en $m'n'$; celle-ci recevra donc tout à coup une impulsion dans un sens opposé, et c'est ce qu'on observe.

QUANTITÉS ET TENSIONS DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES COURANTS INDUITS. — Il faut maintenant chercher à apprécier les quantités d'électricité mises en mouvement et les intensités des courants produits par l'induction. Cette question a été traitée d'abord par MM. Masson et Breguet au moyen de la machine suivante (*fig.* 625).

Un courant partant du pôle + d'une pile arrive par Dd dans une première bobine inductrice D' qui contient à son centre un paquet de fers doux destinés à augmenter son action; il revient par d' dans un rhéotome aa' et de là au pôle —. Par conséquent, il s'établit ou s'interrompt alternativement à des intervalles très-rapprochés quand on fait mouvoir la manivelle M.

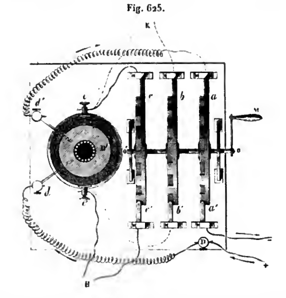
Toutes les fois qu'il s'établit, il détermine dans une deuxième bobine F, qui était composée de 1300 mètres de fils isolés, un courant d'induction inverse, qui va de e' en H, traverse un galvanomètre H, puis un deuxième rhéotome $c'c$ concordant avec le premier, et enfin le fil ce.

Toutes les fois que le courant inducteur est interrompu, il donne naissance à un courant induit direct, partant de e, suivant le conducteur ponctué eK, passant dans un troisième rhéotome bb' dont les dents étaient opposées à celles du premier, et revenant en e'.

On pouvait donc recevoir et étudier séparément ou les cou-

rants inverses en H, ou les courants directs en K. On pouvait

Fig. 625.



aussi les recueillir tous à la fois par les fils e'H et eK à travers un même circuit dans lequel ils avaient des directions alternativement contraires, mais qu'on rendrait identiques au moyen d'un commutateur qui n'est point représenté dans la figure.

Grâce à cet appareil, MM. Masson et Breguet ont découvert deux faits aussi importants l'un que l'autre : 1° Les deux fils qui amènent en K les courants directs produisent des étincelles à distance à travers l'air, chargent un condensateur et, dans l'œuf électrique, donnent naissance à une lueur qui peut atteindre 3 centimètres de longueur. Par conséquent, les courants directs acquièrent une tension bien autrement grande que celle qui est donnée par les piles, et suffisante pour produire tous les effets connus de l'électricité statique. 2° Les deux fils qui amènent en H les courants inverses, développent les mêmes effets, mais avec un degré d'énergie incomparablement moindre : cela veut dire qu'ils prennent une tension plus faible que les précédents. Nous allons chercher l'interprétation de ces faits.

Il est naturel de supposer que le voisinage d'un courant inducteur détermine dans un fil voisin un nouvel état d'équilibre des fluides électriques, état que M. Faraday appelle électrotonique, qui nous est tout à fait inconnu, mais qui doit persister pendant tout le temps que dure l'action qui le produit. Si cette hypothèse est fondée, il faut que l'établissement de cet état nouveau se révèle par un mouvement des fluides dans le fil, c'est-à-dire par un courant d'induction commençante. Au moment où l'action finit, le fil revenant à l'état naturel, doit de toute nécessité être le siége d'un mouvement contraire, c'est-à-dire d'un courant d'induction finissante opposé au premier; et puisque la deuxième période défait ce que la première avait fait, les quantités d'électricité mises en circulation doivent être égales dans les deux courants. Pour préciser cette donnée vague, il faudrait définir l'état électrotonique, ce qu'on n'a pas fait jusqu'à présent; mais c'est déjà quelque chose que de prévoir : 1° une induction commençante que l'expérience montre inverse; 2° un état d'équilibre permanent pendant la durée de l'action; 3° une induction finissante nécessairement opposée à la première, c'est-à-dire directe; 4° cette condition nécessaire, qu'il doit y avoir autant d'électricité mise en jeu dans le premier que dans le dernier courant induit.

Commençons par vérifier ce dernier point. A cet effet et au moyen de la machine de MM. Masson et Breguet, dirigeons, comme le fit M. Matteucci, tous les courants directs et inverses à travers une dissolution de sulfate de cuivre, en faisant communiquer d'une manière permanente les deux poupées e et e' avec deux électrodes plongeant dans ce sel. Si les courants directs et inverses sont égaux en quantité, ils devront détruire leurs effets; or M. Matteucci a précisément constaté qu'ils ne produisaient aucune décomposition.

L'induction se produit à la fois et également sur tous les éléments du circuit qui l'éprouve; par suite, la quantité q d'électricité mise en mouvement est nécessairement proportionnelle à la longueur, c'est-à-dire à la résistance R de ce circuit. Les travaux de M. Felici ont prouvé qu'elle est également proportionnelle à l'intensité I du courant inducteur. On peut donc écrire, en représentant par K une fonction de la

distance des deux fils,

$$q = \mathrm{KIR}.$$

Mais de ce que les courants directs et inverses contiennent des quantités d'électricité égales, il ne faut pas conclure que leurs intensités soient les mêmes : celles-ci dépendent du temps pendant lequel durent ces courants.

Supposons que d'abord on rapproche le fil induit du courant inducteur, les deux états d'équilibre du premier ne dépendent que de ses positions initiale et finale et nullement du temps t qu'il met pour passer de la première à la seconde ; donc la quantité d'électricité q qui est contenue dans le courant induit, ne varie qu'avec ces deux positions et ne change pas quand t change ; mais elle se mesure par le produit du temps par l'intensité moyenne i du courant, et l'on a $q = it$. L'intensité moyenne est donc en raison inverse de t.

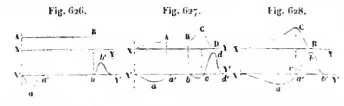
Inversement, si nous ramenons le fil induit à sa première position, il retourne à son état primitif; la même quantité q d'électricité circule en sens opposé; le courant qui manifeste ce retour aux conditions initiales dure pendant le temps t' que ce retour met à s'accomplir ; il prend une intensité i', et l'on a $q = i't'$. On pourra donc faire à volonté que le courant inverse ou le courant direct ait une intensité grande ou petite, il suffira de faire que sa durée soit petite ou grande.

Les mêmes raisonnements s'appliquent à l'induction produite dans un fil par l'établissement et la cessation du courant dans un circuit inducteur voisin, et les intensités des deux courants inverse et direct seront en raison inverse de leurs durées t et t'. Il est probable que ces durées sont sensiblement les mêmes quand le fil inducteur est court et rectiligne ; mais elles cessent de l'être lorsqu'il est long et replié en spirale, à cause des extra-courants qui se produisent au moment de la fermeture et de la rupture du circuit.

En effet, supposons (*fig.* 626) que dans le fil inducteur XY le courant s'établisse brusquement en prenant instantanément son intensité XA, la conservant pendant toute sa durée et la perdant brusquement, de sorte qu'elle puisse se représenter par les ordonnées de la droite AB, en prenant les temps pour abscisses ; les courants d'induction dans le fil X'Y' seront, l'un

inverse $X'aa'$ en commençant, l'autre direct $bb'Y'$ en finissant, et leur durée sera vraisemblablement peu différente.

Mais si, comme cela a lieu surtout dans les circuits repliés en spirale et très-longs, le courant inducteur prend peu à peu son intensité constante de X en A (*fig.* 627), le courant induit inverse $X'aa'$ dure pendant tout le temps t que cette intensité



croît, et ce temps est d'autant plus grand que le fil inducteur est plus long. Au moment de la rupture du circuit XY, l'effet de l'extra-courant est d'augmenter d'abord l'intensité de B en C et de la faire décroître ensuite très-brusquement de C en D; il en résulte une induction double dans $X'Y'$, c'est-à-dire un courant inverse bc, et un courant direct cdd' : celui-ci contient une quantité d'électricité égale à celle que les deux autres $X'aa'$ et bc possèdent à eux d'eux; mais sa durée t' est notablement plus petite que la somme des leurs. Enfin, si le courant inducteur ne reste établi que pendant un temps très-court, ce qui a lieu quand on emploie des rhéotomes, il croît peu à peu jusqu'à un maximum C (*fig.* 628), et cesse brusquement de C en B. Dans ce cas, les deux courants inverses de la figure précédente se réunissent en un seul $X'ac$, qui dure pendant le même temps t que le courant inducteur, et qui a une faible intensité, tandis que le courant direct cbb' conserve une durée t' toujours très-courte et prend une très-grande intensité. Cela conduit à cette première conclusion que *le courant direct d'induction finissante doit avoir une intensité plus grande que le courant inverse d'induction commençante.*

En continuant le même ordre de raisonnements, nous allons être amenés à d'autres conséquences aussi importantes. La quantité d'électricité q est, en général, égale à KIR, et pour le courant inverse elle est représentée par it : on a donc

$$KIR = it.$$

Or pendant le temps t, le circuit induit se trouve dans le même état que si chacun de ses éléments était un couple de pile, et lui-même une pile d'une infinité de couples, dont la force électromotrice totale serait A et la résistance R ; donc

$$i = \frac{A}{R},$$

et, par suite,

$$KIR = \frac{A}{R} t, \quad A = \frac{KIR^2}{t}.$$

On a de même pour le courant direct

$$A' = \frac{KIR^2}{t'},$$

ce qui veut dire que la force électromotrice de chacun des deux courants induits est *proportionnelle à l'intensité du courant inducteur, au carré de la résistance de la bobine induite, et en raison inverse du temps pendant lequel il dure.*

Et puisque le temps t' du courant direct est toujours très-petit et demeure vraisemblablement le même quel que soit R, tandis que la durée t du courant inverse augmente avec le nombre des spires et avec R, *la force électromotrice A' du courant direct est toujours plus grande que A, celle du courant inverse, et le rapport de A' à A, qui est égal à celui de t à t', augmente avec la longueur du fil induit.*

Nous avons jusqu'à présent supposé que le circuit induit était fermé. S'il était ouvert, l'induction agirait toujours et de la même manière ; seulement, au lieu de produire un courant, elle ferait naître aux deux extrémités une différence de tension qui serait proportionnelle à A ou à A', c'est-à-dire qu'elle serait proportionnelle à IR^2, en raison inverse de t ou de t', et par suite qu'elle serait plus grande pour le courant direct que pour le courant inverse. Par conséquent, si on recueille exclusivement au moyen d'un rhéotome les courants directs ou les courants inverses, *les deux extrémités du fil induit produiront tous les effets des conducteurs opposés d'une machine de Nairne, avec une intensité qui dépendra de I et de R, et qui sera plus grande pour les courants directs que pour les courants*

inverses. Cela explique les deux faits principaux découverts par MM. Masson et Breguet.

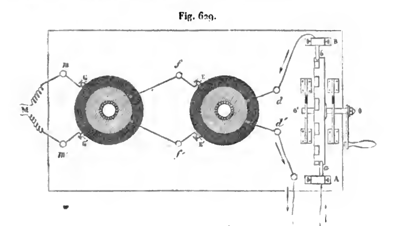
Si les deux extrémites du fil induit étaient séparées par une couche d'air très-mince, les deux courants pourraient la franchir sous forme d'étincelle; si elle devenait plus grande, le courant inverse ne la pourrait plus traverser, mais le courant direct le ferait : c'est en effet ce que l'expérience confirme. Quand on emploie une machine analogue à celle de la *fig.* 625, et qu'on fait passer le courant induit d'abord à travers une couche d'air convenable, ensuite dans un voltamètre contenant du sulfate de cuivre, il se fait une décomposition dans le sens du courant direct, ce qui prouve que le courant inverse est annulé.

Quand l'interruption est assez résistante pour que ni l'un ni l'autre des courants ne puisse passer, voici quel est le mouvement électrique dans la bobine. Au moment de l'induction commençante, une différence de tension s'établit aux extrémités, mais, immédiatement après, l'action électromotrice cesse et les fluides séparés se recombinent à travers la bobine. Au moment où l'induction finissante se produit, il y a encore aux deux bouts du fil une différence de tension inverse de la précédente et plus grande qu'elle; mais elle disparaît de même aussitôt après. En définitive, il y a des tensions alternativement opposées et qui se détruisent pendant les intervalles qui s'écoulent entre leur production. Mais comme celles qui résultent des courants directs sont les plus grandes et se reproduisent à des époques très-rapprochées, un électromètre éprouve une action permanente.

V. **COURANTS INDUITS DE DIVERS ORDRES.** — Faisons passer le courant d'une pile d'abord à travers un rhéotome *ab*, destiné à l'interrompre et à le transmettre alternativement (*fig.* 629), ensuite dans la bobine intérieure *dd'* d'un appareil semblable à celui de MM. Masson et Breguet. Il déterminera dans la bobine extérieure EE' des courants induits inverses quand il commencera, et directs quand il finira. Ces courants sont dits courants du premier ordre. Dirigeons-les ensuite, comme précédemment le courant de la pile, dans une deuxième bobine intérieure *ff'*, ils engendreront dans la bobine envelop-

pante GG′ d'autres courants induits successifs qui sont du

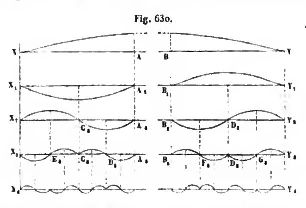
Fig. 629.



deuxième ordre. En multipliant le nombre des appareils, et les reliant de l'un à l'autre comme les deux premiers, on produira d'autres courants du 3ᵉ, 4ᵉ,..., nᵉ ordre, dans la 3ᵉ, 4ᵉ,..., nᵉ bobine extérieure.

Il est facile d'analyser ces phénomènes quand on suppose qu'il ne se produit aucun extra-courant dans les fils. Représentons (*fig.* 630) par les ordonnées d'une courbe XY les intensi-

Fig. 630.



tés de l'un des courants inducteurs envoyés par le rhéotome. Tant qu'elles augmenteront, elles donneront dans le fil du pre-

mier ordre X_1Y_1 un courant inverse X_1A_1; quand elles diminueront, elles en produiront un autre B_1Y_1 qui sera direct. Les deux courants X_1A_1, B_1Y_1 vont maintenant agir sur le fil du deuxième ordre X_2Y_2, comme XY agissait sur X_1Y_1, le premier en donnera deux X_2C_2, C_2A_2, le second en produira deux autres B_2D_2, D_2Y_2, et en répétant les mêmes raisonnements pour le troisième et le quatrième ordre, on arrive aux représentations graphiques dessinées en X_3Y_3 et en X_4Y_4. Chaque courant inducteur doit donc développer deux courants du premier ordre, $4 = 2^2$ du second, $8 = 2^3$ du troisième, et enfin 2^n du n^e ordre.

Quel que soit cet ordre, la loi de l'égalité des quantités d'électricité qui circulent dans un sens ou dans l'autre subsiste comme précédemment; car dans chaque bobine intérieure il y a pendant un temps donné le même nombre de courants dans les deux directions, et chacun d'eux détermine dans le fil qui l'enveloppe deux courants qui contiennent la même quantité d'électricité et qui circulent en sens opposé; d'où il suit qu'en recueillant en M (*fig.* 629), à travers du sulfate de cuivre, tous les courants qui sortent de la dernière bobine, on ne doit avoir aucune décomposition : ce qui se constate en effet.

Mais nous avons supposé que les fils des diverses bobines n'exerçaient aucune induction sur eux-mêmes : cela n'est jamais vrai. Par conséquent les durées et les intensités des courants successifs ne sont pas égales, comme la figure précédente le ferait supposer; et dans chacun des ordres d'induction, il y a toujours un sens pour lequel les courants durent moins et sont plus intenses que dans la direction contraire. Le raisonnement ne permet guère de prévoir quel est ce sens; mais l'expérience va nous le faire découvrir. On peut étudier ces courants par quatre procédés :

1°. En les faisant passer à travers le corps humain : ils sont tous transmis successivement, et, possédant une grande force électromotrice, ils déterminent des commotions violentes;

2°. En les dirigeant à travers un galvanomètre : ils ne produisent qu'un effet insensible; car l'aiguille, sollicitée à des intervalles successifs très-rapprochés par des courants contenant la même quantité d'électricité et de sens opposés, ne doit éprouver et n'éprouve qu'une action permanente faible;

3°. En leur faisant traverser une spirale dans laquelle se trouve une aiguille d'acier qui s'aimante;

4°. En plaçant un voltamètre à eau dans leur trajet.

Les deux derniers procédés méritent seuls de nous arrêter. Le troisième a été employé par M. Henri de Princeton. Il est vraisemblable que l'aimantation du fer ne dépend pas seulement de la quantité d'électricité des courants qui la produisent, mais qu'elle devient de plus en plus énergique à mesure que l'intensité de ces courants augmente, à cause de la force coercitive qu'il faut vaincre. Si cela est, il y aura une aimantation définitive; le pôle austral sera à la gauche des courants qui seront les plus intenses, et en observant de quel côté est ce pôle, on conclura le sens de ces courants prédominants. Voici ce que M. Henri a trouvé :

COURANT	COURANTS INDUITS.				
INDUCTEUR.	1er ordre.	2e ordre.	3e ordre.	$2n$e ordre.	$(2n+1)$e ordre.
Direct.	Direct.	Inverse.	Direct.	Inverse.	Direct.

Mais comme, au moment où ces expériences ont été faites, on ne se rendait pas un compte bien exact de ces actions très-multiples, on pouvait croire que tous les courants d'un ordre élevé se résumaient en un seul, d'une direction unique. M. Verdet fut alors conduit à les faire passer à travers un voltamètre, et il constata qu'à chacun des pôles il se dégageait à la fois de l'hydrogène et de l'oxygène : ce qui prouve qu'en réalité il y a des courants successifs, et que l'aimantation observée par M. Henri n'est produite que par la différence des effets de deux successions de courants opposés, contenant la même quantité d'électricité, mais inégalement intenses.

M. Masson reprit ensuite cette même question, et il confirma les conclusions de M. Verdet. Quand il prenait des électrodes très-fines formées par une pointe de platine enchâssée dans du verre, elles ne se polarisaient pas et chacune dégageait 2 volumes d'hydrogène et 1 volume d'oxygène : ce qui prouve que les quantités d'électricité sont égales dans les deux sens. Il fit ensuite usage d'un artifice déjà employé par M. Verdet, qui consiste à interrompre la communication par un petit intervalle d'air que l'électricité était obligée de franchir sous

forme d'étincelles, et qui arrêtait le courant le moins intense en laissant passer le plus fort; alors celui-ci seul produisait la décomposition de l'eau : il n'y avait plus qu'une espèce de gaz à chaque électrode, et le sens du courant qui avait passé fut précisément celui qui avait été déterminé par les expériences de M. Henri.

VI. **INDUCTION PAR L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.** — C'est M. Masson qui a découvert, en 1834, l'induction développée par la décharge des bouteilles de Leyde. Beaucoup de physiciens ont ensuite étudié cette question; mais nous ne parlerons que des recherches de M. Verdet et de celles que, tout récemment, M. Masson a reprises.

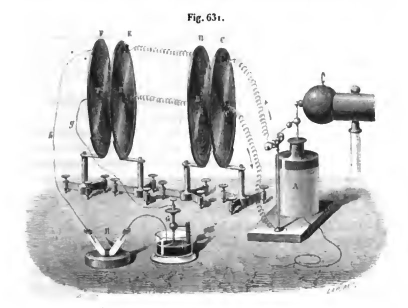
La décharge d'une batterie électrique étant un véritable courant, toute bobine soumise à son influence doit être traversée par deux courants, l'un inverse, d'induction commençante, l'autre direct, d'induction finissante, tous deux égaux en quantités et probablement différents en tension; mais comme leur durée totale est sensiblement égale à celle de la décharge, qui est extrêmement petite, il était difficile de constater leur existence et de les comparer.

M. Verdet charge avec une machine électrique la batterie A (*fig.* 631), qui est posée sur un sol conducteur et qui est munie du micromètre de Lane à l'extrémité d'une tige isolante, de façon qu'elle se décharge d'elle-même aussitôt qu'elle atteint une tension suffisante; alors elle produit un courant qui circule en CC, dans une spirale de fils de cuivre isolés à la gomme laque et appliqués sur un disque de verre. Cette spirale développe les phénomènes d'induction dans une autre, BB, qui est placée en regard et tout près d'elle. BB communique avec une troisième spirale EE, qui à son tour induit la quatrième FF. On peut se contenter des deux premières pour étudier les courants du premier ordre, ou bien en réunir 2, 3,..., couples si l'on veut examiner l'induction du 2e, 3e,..., ordre.

Pour constater l'égalité des quantités d'électricité mises en mouvement dans les deux sens, M. Verdet réunit les extrémités *g* et *h* de la dernière spirale avec un voltamètre H qui contient de l'iodure de potassium. Il n'y a point de décomposition apparente; mais pour s'assurer par une épreuve plus délicate

qu'il ne s'en est produit aucune, M. Verdet enlève le vase H,

Fig. 631.



et mettant ses électrodes en communication avec un galvanomètre sensible, il constate qu'il n'y a point de courant appréciable : cela veut dire que ces électrodes n'étaient point polarisées, et qu'il n'y a conséquemment aucun excès en quantité des courants induits qui vont dans un sens sur ceux qui vont dans l'autre.

M. Verdet mit ensuite dans le trajet des fils *g* et *h* un vase G rempli de mercure et où les courants arrivaient par une vis relevée au-dessus du niveau ; ils traversaient ainsi un intervalle d'air sous forme d'étincelles, et ceux qui sont les moins intenses devaient être arrêtés quand la résistance introduite était suffisamment grande. On put constater qu'alors les lames de platine étaient fortement polarisées dans le voltamètre H. Le sens de cette polarisation fit connaître la direction des courants dont l'intensité était la plus grande : c'est celle du courant direct dans le premier ordre, inverse dans le second, etc. Il n'y a donc aucune différence entre l'induction par les décharges et l'induction par les courants des piles.

M. Masson a chargé la batterie A par une puissante machine d'induction de Ruhmkorff, par un procédé que nous ferons bientôt connaître, qui permet d'obtenir des décharges nombreuses, se succédant très-rapidement, et des courants induits assez intenses et assez répétés pour décomposer l'eau dans un voltamètre : les expériences étaient d'ailleurs disposées comme celles de M. Verdet. Quand on opérait sans le vase G, les deux cloches du voltamètre contenaient à la fois l'hydrogène et l'oxygène en proportions atomiques, ce qui prouve que les deux espèces de courants sont égaux en quantité. Lorsqu'il y avait en G un intervalle d'air à franchir, les gaz étaient séparément transportés à chaque pôle. Alors un seul des deux courants était transmis, et c'était celui qui a été indiqué par M. Henri.

INFLUENCE DES DIAPHRAGMES. — Si l'on place entre le circuit inducteur et la bobine induite une spirale fermée, tout courant inducteur commençant ou finissant engendrera des courants de premier ordre dans la bobine et dans la spirale interposée; mais celle-ci réagissant sur celle-là, y fera naître des courants de second ordre. L'effet sur la bobine sera donc complexe, puisqu'il sera la superposition des courants de premier ordre produits par le fil inducteur, et des courants de second ordre déterminés par la spirale.

La même chose a lieu si on remplace la spirale par des tubes ou par des corps conducteurs qui deviennent le siége de courants de premier ordre circulant dans leur masse; mais rien n'est changé aux effets primitifs si la spirale n'est pas fermée, ou si les tubes sont fendus longitudinalement, ou s'ils sont isolants, parce que les courants de premier ordre ne peuvent circuler ou ne peuvent se produire, et qu'ils ne font naître aucun courant de second ordre dans la bobine.

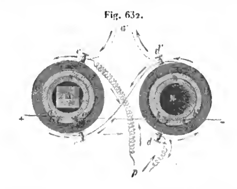
Lorsqu'on cherche à prévoir l'effet de ces interpositions, on conçoit que si le circuit inducteur est alternativement fermé et ouvert, les courants d'induction du premier et du second ordre se succéderont dans la bobine suivant des directions alternativement opposées, et mettront en mouvement les mêmes quantités d'électricité dans les deux sens; d'où il suit que leur superposition déterminera également des courants

alternativement contraires, et satisfaisant à la même condition d'avoir autant d'électricité les uns que les autres ; c'est ce que l'on constate en les faisant passer dans un galvanomètre ou dans le sulfate de cuivre, où ils ne produisent aucun effet permanent.

Mais il est certain que les intensités et le mode de succession des courants qui naissent dans la bobine induite seront changées par l'interposition de la spirale, que leurs quantités d'électricité ne seront plus les mêmes qu'auparavant et que tous leurs effets seront altérés. Le raisonnement ne permet pas de prévoir ces modifications : il faut les étudier par l'expérience.

On doit à M. Dove un appareil ingénieusement disposé pour atteindre ce but. Il est représenté en coupe (*fig.* 632). aAa',

Fig. 632.



bBb' sont deux bobines inductrices creuses, identiques et traversées dans le même sens par le même courant inducteur $+aAa'bBb'-$, qu'on lance et qu'on interrompt par un rhéotome. Elles sont enveloppées de deux bobines induites, elles-mêmes identiques, cCc', dDd'. Celles-ci peuvent être réunies par leurs extrémités semblables c et d au moyen d'un fil représenté par une ligne ponctuée, pendant que c' et d' communiquent de même en G' ; alors elles sont toutes deux au même moment traversées par des courants induits de même sens $\underrightarrow{c'Cc}$, $\underrightarrow{d'Dd}$. Mais elles peuvent être aussi réunies par leurs extrémités opposées, en joignant c et d' d'une part, c' et d de l'autre, par les conducteurs figurés en lignes pleines. Dans ce cas, chacune d'elles développe des courants qui les traversent

toutes deux, qui au même moment sont contraires et qui sont $\rightarrow pc'Ccd'Ddp$ pour la première, et $\leftarrow pc'Ccd'Ddp$ pour la seconde. D'ailleurs ces courants sont égaux, à cause de l'identité des deux bobines doubles; ils se détruisent, et ne produisent aucun effet si on place en p, ou un galvanomètre, ou un voltamètre, ou une spirale à aimantation, ou une portion d'un muscle vivant.

Cela étant, quand on introduit en M, dans l'intérieur de la première bobine, une spirale fermée, ou un tube métallique, ou une masse conductrice quelconque, l'expérience prouve qu'on affaiblit les courants induits dans C, sans diminuer ceux de D, qui alors prédominent, et la différence entre ceux-ci et ceux-là produit en p, toutes les fois qu'on ouvre ou qu'on ferme le circuit inducteur, ou la déviation d'un galvanomètre, ou des actions chimiques, ou l'aimantation d'une aiguille ou des commotions dans les muscles. On reconnaît, de plus, que le courant différentiel observé en p a plus d'intensité que de quantité, car il détermine de fortes commotions et une aimantation énergique, mais peu de déviation galvanométrique et d'action chimique, ce qui prouve que l'introduction de la masse M diminue l'intensité des courants induits en C, plus qu'elle n'affaiblit leur quantité.

Ces courants différentiels sont nuls ou très-faibles quand la masse M n'a point ou n'a que peu d'action sur les courants induits; c'est le cas où elle est formée par une spirale ouverte, ou par un tube fendu, ou par des fils conducteurs réunis en faisceau, ou par des substances isolantes.

Ces résultats ont conduit M. Dove à analyser le rôle des fers doux que l'on place dans les bobines pour augmenter l'induction. On peut rationnellement prévoir que leur rôle est multiple : 1° le fer s'aimante, et par cela même il augmente à la fois la quantité et la tension des courants induits; 2° il est induit comme tous les métaux, et par là il réagit sur la bobine induite et diminue la quantité, mais surtout l'intensité des courants qui la traversent.

D'après cela, supposons que le fer introduit en M soit composé de fils très-fins et isolés les uns des autres, ils produiront peu d'effet inducteur, mais beaucoup d'effet magnétique, et ils augmenteront à la fois la tension et la quantité des courants

dans C; mais si le fer, au lieu d'être en fils, est en gros barreaux sans solution de continuité, il augmentera, par son effet magnétique, la tension et la quantité, et par la réaction d'induction il diminuera beaucoup la tension : les courants produits auront donc moins d'intensité que dans le cas précédent.

C'est ce qu'on peut montrer par une épreuve saisissante : on met en M un barreau de fer, et on introduit un à un en N des fils de fer très-fins, jusqu'à annuler les courants différentiels : on trouve qu'il en faut 110 pour que ces courants deviennent insensibles au galvanomètre, c'est-à-dire pour qu'ils soient égaux en quantité; mais il n'en faut que 40 pour détruire les commotions, c'est-à-dire pour que la tension soit sensiblement la même.

La conséquence qu'il faut tirer de ces expériences est que pour atteindre le maximum d'effet en quantité et en tension, il faut placer dans les bobines inductrices non pas des masses de fer, mais des fils fins et isolés réunis en faisceaux.

SOIXANTE-QUATORZIÈME LEÇON.

DE L'INDUCTION (Suite).

Induction dans les masses métalliques en mouvement. — Magnétisme de rotation. — Expériences de Gambey, d'Arago, d'Herschel et Babbage, de Faraday. — Explication de ces faits. — Analyse des courants dans un disque en mouvement.

Électromoteurs fondés sur l'induction. — Machine de Clarke. — Machine de Ruhmkorff. — Condensateur. — Interrupteur de M. Foucault. — Stratification de la lumière. — Composition de l'étincelle d'induction. — Actions magnétiques.

INDUCTION DANS LES MASSES MÉTALLIQUES EN MOUVEMENT.

MAGNÉTISME DE ROTATION. — Gambey découvrit en 1824 qu'une aiguille aimantée qui oscille sous l'influence terrestre, revient au repos beaucoup plus rapidement quand elle est suspendue au-dessus et très-près d'une masse considérable de cuivre, que si elle en est éloignée. Arago traduisit immédiatement cette expérience en disant qu'elle prouve l'existence d'une force qui agit entre l'aiguille et le métal, qui est opposée à leur mouvement relatif et qui peut se comparer à la résistance produite par un frottement. Cette interprétation le conduisit à penser que si on faisait tourner la masse de cuivre autour d'un axe dirigé suivant le pivot de l'aiguille, on développerait ce frottement fictif, et qu'on entraînerait l'aiguille dans le même sens que le métal. Cette conséquence fut vérifiée par l'expérience suivante.

La *fig.* 633 représente une boîte cubique en bois, fermée à sa face supérieure par une peau tendue CD, au centre de laquelle on pose le pivot O d'une aiguille aimantée AB. EF est un disque de cuivre fixé à un axe HC qu'on met en mouvement par deux roues d'engrenage et par une manivelle. Lorsque EF tourne lentement et uniformément, l'aiguille se dévie d'un angle constant; la déviation augmente avec la vitesse de

rotation, et quand celle-ci est suffisamment grande, l'aiguille se met à tourner dans le même sens que le disque.

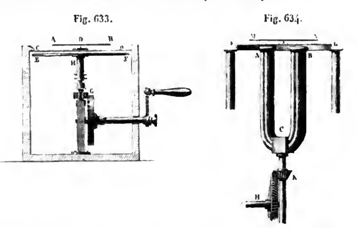


Fig. 633. Fig. 634.

MM. Babbage et Herschel, au lieu de suspendre une aiguille au-dessus d'un disque en mouvement, placèrent en équilibre sur un pivot central un disque de cuivre MN (*fig.* 634), au-dessus d'un aimant ACB qu'ils faisaient tourner au-dessous de la membrane FG : Cette expérience est l'inverse de la précédente. Le raisonnement qui avait guidé Arago montre encore ici que le disque doit suivre le mouvement, et l'expérience confirme le raisonnement.

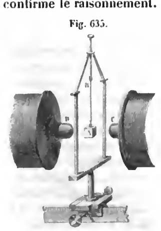


Fig. 635.

Enfin de même que MM. Herschel et Babbage avaient renversé l'expérience d'Arago, de même M. Faraday renversa celle de Gambey. Puisque la présence d'une masse métallique en repos arrête les oscillations d'une aiguille aimantée, il faut que le voisinage d'un aimant immobile arrête le mouvement d'un métal tournant. Pour vérifier cette induction, M. Faraday suspendit à un fil tordu B un cube de cuivre A, qui était placé entre les

pôles D et C d'un électro-aimant énergique, et qui se mettait à tourner rapidement autour de son axe de suspension quand on laissait le fil se détordre (*fig.* 635). Il vit le cube s'arrêter instantanément, quelle que fût sa vitesse, aussitôt qu'il aimantait le fer doux, et reprendre son mouvement aussitôt qu'en ouvrant le circuit inducteur il ramenait le fer à l'état naturel.

Nous devons ajouter que les mêmes phénomènes se produisent quand on remplace l'aimant par un solénoïde, ou par une bobine de fils.

Toutes ces expériences ne sont évidemment que des moyens divers de constater une même action ; elles peuvent se résumer par une loi générale, qui est celle-ci : « Toutes les fois qu'un aimant ou un solénoïde est en présence d'une masse métallique continue, et qu'on donne à l'aimant et au métal un déplacement relatif; il se produit une force qui tend à empêcher ce déplacement, c'est-à-dire à arrêter celui des deux corps que l'on a fait mouvoir, ou à entraîner celui que l'on n'a pas mis en mouvement. »

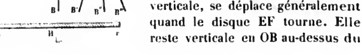
A l'origine on ne connaissait aucune classe d'actions à laquelle on pût rapporter ces phénomènes; on les désignait sous le titre assez mal choisi de *magnétisme en mouvement;* et dans l'ignorance où on était de leur cause, la seule chose qu'il y eût à faire était d'en étudier expérimentalement les lois. Arago commença par chercher la direction des forces qui sollicitent l'aiguille.

1°. L'expérience primitive (*fig.* 633) montre que cette aiguille est sollicitée perpendiculairement à sa direction par une composante horizontale y agissant dans le sens du mouvement.

2°. Il existe une composante verticale répulsive z, car en suspendant une aiguille au plateau d'une balance, au-dessus du disque EF, elle diminue de poids quand on le fait tourner.

3°. Enfin il y a une troisième composante x, dirigée suivant les rayons du disque tournant, car une aiguille d'inclinaison qui est mobile dans un plan normal au méridien magnétique, et qui doit être verticale, se déplace généralement quand le disque EF tourne. Elle reste verticale en OB au-dessus du

Fig. 636.

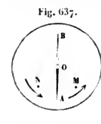


centre (*fig.* 636); elle se rapproche de ce centre en O'B'; redevient verticale en O''B'' à une certaine distance du bord, et plus loin elle prend une inclinaison opposée. Cela prouve que la troisième composante x est attractive, nulle et répulsive suivant la distance du pôle B au centre de rotation. La résultante de ces trois forces perpendiculaires est évidemment dirigée dans l'angle trièdre qu'elles forment.

C'est là tout ce què ces expériences nous ont appris à ce sujet. La question ne fit aucun progrès jusqu'au moment où M. Faraday eut découvert l'induction; mais à partir de cette époque, la cause du magnétisme de rotation devint évidente, et toutes les circonstances de l'expérience purent être expliquées.

EXPLICATION. — Nous savons en effet, surtout depuis les expériences de M. Henri et de M. Dove, qu'une masse continue de métal est induite par un solénoïde ou par un aimant voisin. Par conséquent, dans les phénomènes que nous étudions, l'aimant détermine nécessairement des courants d'induction dans le disque, quand il se meut en présence de celui-ci, ou quand, inversement, celui-ci se déplace par rapport à lui. Nous savons en outre que ces courants induits tendent à détruire par leur réaction électrodynamique le mouvement qui leur a donné naissance; ils agissent donc comme le ferait un frottement. D'où il résulte que la loi établie par Arago à propos du magnétisme de rotation est précisément la même que la loi de M. Lenz, et que l'induction explique en deux mots les expériences de Gambey, d'Arago, d'Herschel et Babbage, et de Faraday. Reprenons chacune d'elles en particulier.

Fig. 637.



1°. Soit AB (*fig.* 637) l'aiguille de Gambey, et supposons que dans l'une de ses oscillations elle aille suivant les flèches de N en M. En s'approchant de la partie M, elle y développe des courants qui la repoussent, en s'éloignant de N elle en fait naître qui l'attirent, donc le disque agit pour la ramener au repos.

2°. Si la masse métallique tourne de N vers M, et que l'aimant soit fixe, il repoussera par induction les points tels que N,

qui s'approchent de A, et attirera M, qui s'en éloigne : donc le mouvement du métal s'arrêtera, comme le montre l'expérience de M. Faraday.

3°. MM. Herschel et Babbage font tourner l'aimant avec une force continue, alors le pôle A repousse avec une force continue les points M vers lesquels il marche, et attire les parties N dont il s'éloigne; conséquemment, il entraîne le métal avec lui.

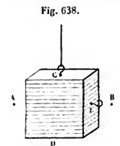
4°. Enfin dans l'expérience d'Arago, c'est le disque qui reçoit un mouvement continu de N en M. N s'approche de A et le repousse, M s'en éloigne et l'attire; donc A se déplace dans le même sens que le disque.

Si cette explication est vraie, toutes les circonstances qui favorisent l'induction augmenteront la réaction dynamique, et toutes celles qui diminuent celle-là feront décroître celle-ci. On sait que l'induction est plus considérable dans les corps bons conducteurs que dans ceux qui le sont moins, et qu'elle est nulle dans les substances isolantes : or Arago a précisément constaté que l'entraînement de l'aiguille se fait avec une force qui décroît en même temps que la conductibilité du disque tournant et qui s'annule quand ce disque est en verre. M. Dove a montré que l'induction est nulle sur un tube fendu qu'on introduit dans une bobine; Arago, qui semble avoir pressenti cette circonstance, avait fait scier un disque, de manière à le diviser en six secteurs égaux qui n'adhéraient entre eux que par leur sommet, et leur effet sur l'aiguille était devenu nul; mais il se rétablissait, bien que moins énergiquement, quand on remplissait de soudure les solutions de continuité.

Voici enfin une dernière conséquence et une dernière vérification de cette théorie. Quand un circuit assujetti à se mouvoir autour d'un axe est astatique par rapport à un aimant voisin, on peut le faire tourner sans y développer aucun courant d'induction, par conséquent sans que l'aimant agisse pour arrêter le mouvement : c'est ce que prouve l'expérience suivante, imaginée par M. Matteucci. Il prépare un cube avec des lames de cuivre parallèles, séparées par des feuilles de papier (*fig.* 638), et il le suspend par un crochet C, entre les pôles d'un électro-aimant, pour remplacer le cube massif A (*fig.* 635) de l'expé-

rience de M. Faraday. Les courants qui pourraient circuler dans les lames de cuivre sont nécessairement horizontaux et astatiques par rapport à ceux de l'aimant qui sont verticaux : d'où il résulte que le cube tourne avec une vitesse qui ne se ralentit point quand on aimante subitement l'électro-aimant. Mais si on le suspend par le crochet E, les lames deviennent verticales et peuvent transmettre des courants qui cessent d'être astatiques, alors elles s'induisent sous l'influence de l'aimantation et leur mouvement de rotation s'arrête aussitôt qu'on la développe.

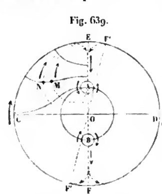
Fig. 638.



C'est à M. Faraday que l'on doit d'avoir expliqué par l'induction les phénomènes du magnétisme de rotation; mais il ne s'est point contenté de montrer combien cette explication est plausible, il s'est appliqué encore à prouver que des courants circulent en réalité dans les disques qu'on met en mouvement. Nous allons le suivre dans cette nouvelle étude.

ANALYSE DES COURANTS DANS UN DISQUE EN MOUVEMENT. — Rappelons d'abord l'expérience de la roue de Barlow. Si un pôle austral A est placé sous le disque E′E′FF′ (*fig.* 639), et qu'un courant aille de O en E, il fera tourner ce disque de manière à placer le pôle austral à sa gauche, par conséquent dans le sens EE′.

Fig. 639.



Si donc on fait directement tourner ce disque de E en E′, au moyen d'une manivelle ou d'un ressort, on y développera un courant induit opposé qui sera continu et marchera de E en O, c'est-à-dire de la circonférence au centre. Il irait du centre à la circonférence dans le cas où le mouvement serait contraire. Enfin si au-dessus du disque se trouve un pôle boréal opposé à A, il produira un effet égal à celui du pôle austral

que nous venons de supposer au-dessous, et les deux actions s'ajouteront.

Pour justifier expérimentalement cette conséquence, M. Faraday a placé le disque entre les pôles d'un électro-aimant, que nous supposerons projetés en A, et il l'a fait tourner autour de l'axe O. Il mettait cet axe en communication permanente avec un des bouts d'un galvanomètre, dont l'autre extrémité se terminait par un ressort appuyé et frottant sur le bord du disque en E. Il a aisément constaté l'existence d'un courant allant de E en O quand le disque tournait de E en E', et qui changeait de direction avec le sens du mouvement.

Laissant le pôle austral en A, plaçons maintenant un pôle boréal en B, au-dessous du même disque. En répétant le même raisonnement pour ce pôle B, nous voyons qu'un courant allant de F en O placerait B à sa droite et ferait tourner le disque dans le sens FF' ou EE'. Par conséquent ce mouvement développera dans OF un courant opposé allant de O en F. Ainsi les deux pôles A et B donneront deux courants, l'un de E en O, l'autre de O en F, et qui se prolongeront. On les constate en appuyant sur les points E et F les deux bouts du galvanomètre.

Il est clair que ce courant d'induction EF devra ensuite se compléter dans la masse du disque en se bifurquant symétriquement, à partir de F, en deux branches qui viendront symétriquement se réunir en E. Mais l'expérience seule pouvait indiquer leur marche, et c'est M. Matteucci qui en dernier lieu l'a complétement déterminée.

Il faisait tourner au-dessus d'un électro-aimant, dont les pôles étaient en A et B, un disque horizontal de cuivre sur la surface duquel il promenait les deux extrémités d'un galvanomètre; elles servaient de sondes pour reconnaître les courants du disque, car si elles se trouvent dans la direction de l'un d'eux, elles recueillent un courant dérivé qui dévie l'aiguille, surtout si le galvanomètre est à fils gros et courts. Soient M et N les deux points touchés. Lorsque les tensions déterminées en ces points par les courants qui y passent seront égales, aucun courant dérivé n'apparaîtra; mais quand, laissant fixe le point M, on place la deuxième sonde en un point N' voisin de N, il aura une tension plus grande ou plus petite que M, s'il

est d'un côté ou de l'autre de l'arc MN, et dans les deux cas il y aura dans le galvanomètre des courants opposés. On peut donc aisément déterminer la direction des arcs MN par l'expérience, puis rapporter les points touchés à deux axes rectangulaires, l'un EF, l'autre CD, et enfin tracer les courbes d'égale tension ou de courants nuls. Voici maintenant le résultat de ces déterminations.

Quand la vitesse n'est pas trop grande, tout est symétrique par rapport aux axes CD et EF; il suffit donc de marquer les lignes d'égale tension dans un seul des quatre quadrants : on les a représentées par des lignes pleines dans l'angle COE. L'une d'elles est l'axe CD; il y en a une autre qui est circulaire et passe par A et B, puis elles changent de forme à mesure qu'on s'éloigne de A.

On conçoit maintenant que si on mène les trajectoires orthogonales de ces lignes, elles indiqueront la direction des courants maximas qui traversent la plaque. On les a représentées par des lignes ponctuées; l'une d'elles, déjà reconnue par M. Faraday, est l'axe EF.

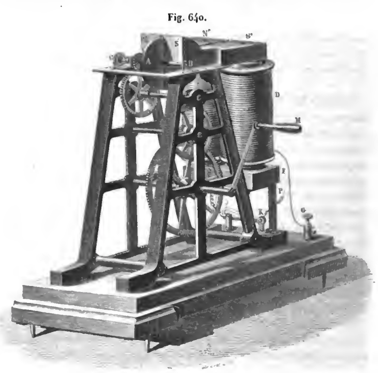
RETARD DES COURANTS INDUITS. — Toute action physique exige un temps déterminé pour se transmettre et se développer. Il est donc probable que les courants d'induction, au lieu de se produire au moment même où agit l'action inductrice, sont en retard sur elle. C'est ce que M. Faraday avait formellement reconnu, mais c'est ce qui résulte très-clairement des expériences de M. Matteucci. Nous venons de dire que la ligne des pôles AB était un axe de symétrie pour les courants qui naissent dans la plaque. Cela est approximativement vrai quand la vitesse n'est pas considérable; mais, à mesure qu'elle augmente, on voit cet axe de symétrie s'écarter dans le sens du mouvement, se placer en E'F', et faire avec EF un angle qui augmente avec la vitesse. Or c'est précisément à cause de ce déplacement de EF qu'un aimant AB suit le mouvement du disque dans l'expérience d'Arago; car si les courants développés étaient symétriques à droite et à gauche de AB, ils agiraient également dans les deux sens et l'aimant resterait immobile.

Quand on a terminé l'analyse d'un phénomène, il est toujours

utile de le reconstituer par la synthèse. M. Matteucci a eu cette heureuse idée. Il a placé sur un disque de cire des fils de cuivre dans les positions figurées en lignes ponctuées, et il les a fait traverser par des courants. Il constitua ainsi de toutes pièces un ensemble de courants immobiles, identiques à ceux que le mouvement du disque engendre dans son intérieur en présence d'un aimant. Dès lors si leur axe de symétrie est en E'F', et qu'on mette au-dessous une aiguille aimantée en AB, elle devra éprouver la même action que dans l'expérience d'Arago, c'est-à-dire être attirée vers E'F'. C'est en effet ce qui est arrivé.

Nous terminerons ce sujet en rappelant et en complétant la belle expérience que nous avons décrite (tome II, page 433), et que l'on doit à M. Foucault. Voici les faits qu'on observe

Fig. 640.



(*fig.* 640) : 1° on met en mouvement le disque A, et il s'arrête

brusquement aussitôt qu'on fait passer un courant dans les bobines D et E; 2° on continue le mouvement en agissant sur la manivelle et l'on constate qu'il faut vaincre une résistance passive et dépenser un travail considérable tant que l'aimantation persiste; 3° on reconnaît que le disque s'est échauffé quand ce travail a été continué pendant quelque temps. Nous avons conclu de ces faits que le travail se transforme en chaleur. Reprenons maintenant la série de ces faits, et complétons leur explication.

1°. Le disque ayant une vitesse acquise, s'arrête au moment de l'aimantation : il s'arrête par la réaction des courants d'induction; c'est l'expérience de M. Faraday.

2°. On continue le mouvement en faisant agir une force continue : alors les courants d'induction sont continus eux-mêmes; ils agissent pour produire un mouvement contraire à celui qui les détermine, c'est-à-dire une résistance; de là le travail qu'il est nécessaire de dépenser.

3°. Il y a de la chaleur produite, parce que les courants d'induction échauffent leurs conducteurs.

Nous avions constaté précédemment les deux termes extrêmes de cette série d'actions, et nous les avions opposés l'un à l'autre, en disant que le travail s'est transformé en chaleur, sans nous occuper de l'intermédiaire qui produit cette transformation. Ce qu'il y avait d'important à démontrer alors, c'est que la nature de cet intermédiaire est sans influence sur la relation qui existe entre les quantités de travail dépensé et de chaleur produite. Aujourd'hui il était intéressant d'analyser le mécanisme de cette transmutation, et nous voyons qu'elle est double : que le travail produit des courants d'induction; que les courants d'induction développent de la chaleur, et que travail, quantité d'électricité et chaleur développée, sont proportionnels.

ÉLECTROMOTEURS FONDÉS SUR L'INDUCTION.

Des principes que nous venons de poser, résultent des conséquences précieuses. Puisque les aimants approchés et éloignés alternativement d'une bobine y développent des courants d'induction de sens alternativement opposés, on pourra

construire des machines qui, par suite d'un mouvement imprimé à un aimant, feront naître dans une bobine voisine des courants électriques qu'on pourra utiliser. En second lieu, comme la force électromotrice résultant de l'induction est proportionnelle au carré de la résistance des bobines, il sera possible, avec des courants inducteurs de faible tension, d'engendrer dans un circuit voisin très-long, d'autres courants qui en auront une très-grande, et de produire tous les effets des machines électriques.

Le premier électromoteur fondé sur l'induction est dû à Pixii; il dérive d'un principe qui nous est déjà connu. Nous avons fait voir (page 280, *fig.* 620) que si l'on met en présence un aimant AB et un solénoïde A′B′, et qu'on donne à l'un des deux appareils un mouvement de rotation autour de l'axe commun OO′, on développe dans le fil du solénoïde des courants d'induction inverses de ceux qui produiraient le mouvement, et qui changent de signe toutes les fois que les pôles des deux appareils passent l'un devant l'autre. Ces courants seront évidemment augmentés si le solénoïde est enroulé autour d'un fer doux; car celui-ci s'aimante et se désaimante quand il s'approche ou s'éloigne de l'aimant fixe, et il ajoute son effet à celui de cet aimant. Dans la machine de Pixii la bobine A′B′ était fixe, et l'aimant tournait autour de l'axe vertical OO′, au moyen d'une manivelle et d'engrenages disposés comme ceux de la *fig.* 634. Mais cet instrument, difficile à construire et à manier à cause du poids de l'aimant, a été très-avantageusement remplacé par celui de Clarke, qui est fondé sur le même principe, mais dans lequel l'aimant reste fixe pendant que la bobine, qui est plus légère, est mise en mouvement.

MACHINE DE CLARKE. — Sur une base en bois s'élève verticalement en équerre une planche GG′ qui sert à fixer un aimant très-fort EE (*fig.* 641). Un axe en bronze OO′O″ qui tourne sur des coussinets de cuivre, porte les deux bobines L et M. Celles-ci sont enroulées sur deux cylindres de fer doux, réunis entre eux par une pièce de même métal qu'on voit dans la figure, et dont les extrémités opposées passent, à chaque demi-révolution, en face et tout près des deux pôles de l'aimant; les deux bouts du fil enroulé sont réunis à l'axe OO′, et l'on

recueille les courants d'induction par des mécanismes particuliers, qu'il nous reste à décrire.

Fig. 641.

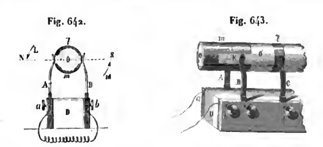


Sur la base de la machine est fixé un parallélipipède de bois D (*fig.* 642 et 643), garni sur ses deux faces de deux lames métalliques *a* et *b*, sur lesquelles s'implantent des languettes A, B, C, qui appuient sur l'axe par leur élasticité ; enfin les fils qui recueillent et transmettent les courants à l'extérieur, sont engagés et serrés par des vis en *a* et *b*.

L'axe peut être terminé par une pièce spéciale *lm* (*fig.* 642), composée de deux demi-anneaux *l* et *m*, séparés par de l'ivoire et communiquant, le premier *l* à la bobine L, l'autre *m* à M. Supposons que le mouvement de ces bobines se fasse dans le sens des flèches. Pendant qu'elles s'approchent des deux pôles N et S de l'aimant fixe, les languettes A et B pressent sur *m* et *l*, et transmettent le courant dans un certain sens.

Au moment où les deux bobines atteignent et dépassent la

ligne des pôles, le courant change de signe, mais les deux


Fig. 642. Fig. 643.

languettes traversent la ligne d'interruption de *l* et de *m* et échangent leur point d'appui; d'où il suit que le courant conserve la même direction dans le circuit extérieur qui joint *a* et *b*.

On se sert de ce commutateur toutes les fois qu'on veut produire des actions chimiques, et en général toutes les fois qu'il est nécessaire de conserver au courant extérieur un sens constant. Cela est inutile quand on veut simplement produire des commotions ou obtenir des étincelles; alors on emploie des bobines très-résistantes, ce qui donne aux courants une très-grande force électromotrice, que l'on peut encore augmenter en recueillant l'extra-courant. A cet effet, on termine l'axe par deux anneaux isolés *l* et *m*, qui sont joints aux bobines L et M (*fig.* 643); le premier est en communication continue avec la languette C, et le second avec les deux autres A et B. Comme B et C sont réunies entre elles, on voit que le courant induit traversera *bb'*, excepté au moment où une interruption K pratiquée sur l'anneau *m* interceptera la communication entre B et C. A ce moment, le courant passera par A*abb'*C, et il s'y ajoutera l'extra-courant provenant de l'interruption. On place la fente K dans une position telle, qu'elle passe devant la languette B au moment où les bobines sont verticales, c'est-à-dire quand le courant induit atteint son intensité maxima.

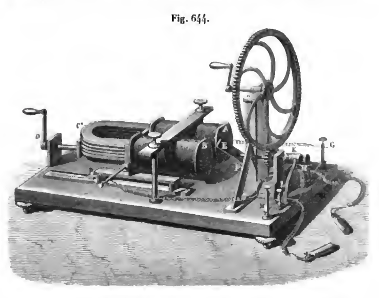
On constate avec la machine de Clarke, que les courants d'induction possèdent tous les propriétés des courants fournis par les électromoteurs ordinaires; ils produisent les mêmes actions chimiques, les mêmes effets calorifiques et lumineux. Ils offrent ceci de remarquable qu'ils ont une grande tension; en

effet, leur force électromotrice variant comme le carré des longueurs de la bobine, peut être indéfiniment augmentée.

Dans ces derniers temps, une compagnie industrielle s'est constituée pour exploiter ce genre d'électromoteurs. Au lieu d'une simple machine de Clarke, elle a fait construire des appareils puissants, consistant en une série de bobines disposées sur une circonférence de cercle, mise en mouvement par une machine à vapeur et passant entre les pôles d'aimants fixes. On obtient par là une série de courants dont les sens sont alternativement contraires, mais qui, malgré ces inversions fréquemment répétées, donnent entre deux cônes de charbon un arc voltaïque qui paraît continu et dont la lumière équivaut à celle de 180 becs carcel ordinaires.

On a beaucoup varié la forme de cet appareil d'induction, surtout à cause des usages médicaux qu'on en fait actuellement. Nous ne décrirons pas toutes les modifications qu'on lui a fait subir : nous nous contentons de donner ici (*fig.* 644) le

Fig. 644.

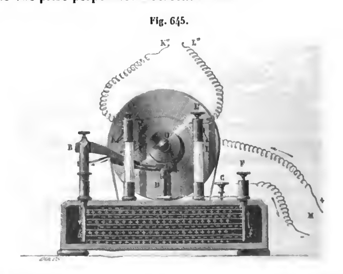


dessin de l'appareil de Page. Un morceau de fer doux EF peut recevoir, au moyen d'une roue dentée, un mouvement de rotation rapide en face des pôles d'un aimant AB. Cet aimant, qui

glisse sur des coulisses P, et qu'on peut éloigner ou rapprocher par une vis à manivelle D, est enveloppé d'une bobine prolongée par des fils conducteurs jusqu'aux poupées M et G. Il est évident que le fer doux, qui s'aimante dans des sens alternativement contraires à chaque demi-révolution, doit développer des courants dans la bobine, et l'on recueille ceux-ci par le moyen de deux languettes L et H, qui s'appuient en K' sur l'axe, et permettent de ne recueillir dans un circuit extérieur que l'extra-courant. M. Verdet s'est servi de cet appareil pour démontrer, entre autres points importants, que l'inversion des courants ne se fait pas au moment précis où la lame EF passe devant les pôles A et B, mais quelque temps après, parce que l'induction exige toujours pour s'établir un intervalle appréciable.

MACHINE DE RUHMKORFF. — Nous avons vu comment MM. Masson et Breguet étaient parvenus à produire des effets notables de tension avec les courants induits. Leur machine, perfectionnée par M. Ruhmkorff, est devenue un des instruments les plus précieux de la physique. On en a représenté (*fig.* 645) une vue prise perpendiculairement à l'axe.

Fig. 645.



Au centre de l'appareil, en O, se trouve un faisceau de fils de

fer doux; la bobine inductrice enveloppe ce faisceau, elle est contenue dans un cylindre isolant de verre ou de caoutchouc durci, représenté par un cercle ponctué; elle est composée d'un fil de 2 à 2,5 millimètres de diamètre, faisant environ 300 tours, et dont les extrémités communiquent, l'une en + M, l'autre en A. La bobine induite est enroulée sur le cylindre isolant; elle est constituée par un fil beaucoup plus fin, dont le diamètre ne dépasse pas $\frac{1}{4}$ de millimètre, qui fait au moins 30000 tours, et qui est très-soigneusement isolé au milieu d'un mastic de gomme laque fondue. Les deux extrémités de ce fil sortent de l'appareil en K et en L et communiquent à deux poupées isolées K' et L', qui peuvent être mises en rapport avec un circuit extérieur quelconque.

Jusque-là l'appareil est identique à celui de MM. Masson et Breguet; il en diffère par l'appareil destiné à fermer et à ouvrir alternativement le circuit inducteur. Le rhéotome adopté par M. Ruhmkorff, et qui est représenté dans la figure, avait été imaginé par M. de la Rive. Le courant partant de + M entre dans la bobine par l'extrémité opposée; il sort par A et arrive à la poupée B; de là il passe par un levier très-mobile BC jusqu'à un marteau C, dont la tête est en fer et la base en platine, et qui repose par son poids sur une enclume D également revêtue de platine à sa face supérieure. Le courant continue sa route du marteau C à l'enclume D, de D à la poupée F, et retourne au pôle négatif de la pile M. Mais à peine a-t-il commencé à circuler, que les fils de fer O s'aimantent et soulèvent le marteau, ce qui établit une interruption entre C et D. Immédiatement après, le fer se désaimante; alors le marteau retombe et rétablit la communication. Il est clair que ces alternatives de passage et d'interruption se continueront indéfiniment; on pourra les rendre plus ou moins rapides en soulevant ou en abaissant par une vis G la lame élastique sur laquelle se pose l'enclume.

Or, d'après les lois connues de l'induction, la bobine induite sera traversée par des courants directs toutes les fois que le marteau se soulèvera, et par des courants inverses quand il s'abaissera; les uns et les autres contiendront la même quantité d'électricité, et comme la bobine est très-résistante, ils auront une force électromotrice considérable. Mais, ainsi que

nous l'avons précédemment démontré, la force électromotrice des courants directs croît proportionnellement au carré de la résistance, celle des courants inverses croît moins rapidement, d'où il résulte que la tension des premiers l'emportera de beaucoup sur celle des seconds. C'est ce qui va nous expliquer les curieux phénomènes présentés par la machine de Ruhmkorff.

1°. Si l'on réunit les extrémités K″ et L″ par un voltamètre à sulfate de cuivre, le sel sera alternativement traversé en sens contraire par des flux égaux d'électricité, qui ne produiront aucune décomposition apparente, parce qu'ils se détruisent mutuellement.

Mais quand on interposera un voltamètre à eau dans le circuit, on trouvera des gaz dégagés aux deux pôles : ils devraient y former deux volumes égaux, contenant l'oxygène et l'hydrogène en proportions atomiques; mais comme il y a des polarisations d'électrodes qui se succèdent dans des sens inverses, qui dépendent à la fois de l'intensité des courants, du temps pendant lequel ils durent, et de la nature des deux gaz, les proportions et les quantités de ces gaz seront inégales dans les deux cloches.

2°. L'aiguille d'un galvanomètre placé en K″L″ sera sollicitée en sens opposés par les deux quantités égales d'électricité qui circulent alternativement dans des directions contraires. Les deux effets seraient égaux et s'annuleraient absolument si les tensions et les durées étaient égales; comme elles ne le sont pas, on doit s'attendre à constater une déviation résultante : elle se manifeste en effet dans le sens des courants directs, mais elle est extrêmement faible.

3°. Laissons entre K″ et L″ un intervalle d'air d'abord très-petit, les deux espèces de courants auront une tension suffisante pour le franchir sous forme d'étincelle, mais ils le feront en proportion inégale. En effet, si nous considérons l'un d'eux en particulier, nous concevons que sa force électromotrice est pour ainsi dire instantanée; elle développe aux deux extrémités K″ et L″ deux tensions, l'une positive, l'autre négative, puis elle cesse. Dès lors une partie de l'électricité doit franchir l'intervalle K″L″, et un autre se recombiner à travers le fil, après que la force électromotrice a cessé d'agir : la première

est évidemment d'autant plus grande, que la tension a été plus considérable et l'intervalle moins grand. On ne recueillera donc à travers l'intervalle K″L″, ni toute l'électricité des courants directs, ni toute celle des courants inverses; mais on recueillera une proportion plus grande des premiers que des seconds, parce qu'ils ont plus de tension.

A mesure que l'intervalle augmentera, les courants directs prendront sur les autres une prédominance d'autant plus marquée; finalement, ils passeront exclusivement. Aussi MM. Poggendorff, Verdet et Masson ont-ils constaté que tous les effets galvanométriques et chimiques allaient en croissant dans le sens des courants directs quand l'intervalle entre K″ et L″ augmentait, l'interruption faisant l'effet d'une espèce de filtre qui arrête les courants inverses. Alors on voit entre les deux pointes jaillir une série d'étincelles vives et brillantes, comme si l'on opérait avec une machine électrique.

4°. Lorsque enfin l'interruption est assez grande pour que les deux espèces de courants soient trop faibles pour la traverser, tout se réduit à des tensions successives alternativement opposées, et à des recombinaisons intérieures de fluides pendant les intervalles : mais comme les tensions des courants directs sont les plus fortes, un électroscope les accuse exclusivement comme si elles étaient continues, c'est encore ce que M. Poggendorff a constaté.

CONDENSATEUR. — La longueur des étincelles que l'on obtenait avec les premières machines, ne dépassait pas 4 à 5 millimètres. Il y avait en effet une cause d'affaiblissement qu'il est facile de concevoir. Au moment où le marteau se soulève et que le courant inducteur est interrompu, l'extra-courant se produit et détermine entre le marteau et l'enclume une étincelle qui continue le courant inducteur, lequel ne cesse point brusquement: d'où il suit que la durée du courant induit direct est prolongée, et que sa tension est affaiblie. Cette étincelle a un autre inconvénient : elle altère rapidement les surfaces de platine entre lesquelles elle se produit, et souvent les fait adhérer l'une à l'autre; il faut donc ou la détruire, ou au moins la diminuer.

Pour cela, M. Fizeau a disposé, dans la base même de l'ap-

pareil, un condensateur de très-grande surface, formé par une lame de taffetas repliée et qui sépare deux feuilles d'étain qui en sont les armatures. Ces armatures sont conventionnellement représentées dans la *fig.* 645; l'une marquée + + ..., est en communication avec la poupée B, l'autre désignée par — — —, est reliée à F. Lorsque le marteau se soulève, et que le courant inducteur en s'interrompant éprouve son redoublement d'intensité, il se répand dans le condensateur qu'il charge; l'électricité positive s'écoule par AB*b* sur les armatures + + ..., et le fluide négatif s'accumule par DF*f* sur les lames — — —; dès lors l'étincelle d'induction diminue, puisque les fluides qui la produisaient trouvent un grand espace où ils se distribuent.

A peine sont-ils accumulés sur le condensateur, qu'ils tendent à se recombiner en suivant le conducteur *b*BA, puis la bobine inductrice, puis la pile M, puis enfin F*f* et les lames — — —; il en résulte un courant opposé à celui de la pile et qui détruit brusquement l'aimantation du fer doux, ce qui fait que le courant induit direct est moins prolongé et par conséquent plus intense. L'amélioration que la machine éprouve par l'addition de ce condensateur est manifeste; les étincelles augmentent jusqu'à 8 ou 10 millimètres, et l'altération des surfaces du rhéotome n'est plus aussi rapide.

MACHINES CLOISONNÉES. — Puisque la tension aux extrémités K″ et L″ est proportionnelle au carré de la longueur du fil induit, on conçoit que, théoriquement, elle peut être indéfiniment augmentée. Dans la pratique, on a eu à lutter contre de grandes difficultés. On construisait les bobines en enroulant le fil par couches superposées, sous forme de spirales qui allaient d'une extrémité à l'autre, et revenaient au point de départ; il en résultait que deux fils superposés étaient séparés par la longueur totale de deux assises, longueur très-grande; ils avaient donc une différence de tension considérable, et capable de briser l'enduit isolant qui les séparait. Quand une rupture s'était ainsi produite, l'appareil perdait une longueur effective de fils égale à celle des deux assises qui se mettaient en communication, et le mal ne pouvait être réparé qu'en démontant la bobine.

Le procédé auquel on s'est arrêté pour remédier à cet inconvénient a été proposé par M. Poggendorff. Il consiste à fractionner la bobine totale en un grand nombre d'autres qui sont juxtaposées. De cette façon, la différence de tension entre deux spires consécutives est toujours faible, et la résistance des vernis toujours suffisante pour isoler les fils. On a pu dès lors augmenter la puissance des machines, et obtenir des étincelles de 40 centimètres.

Mais alors les inconvénients de l'interrupteur se font de nouveau sentir, et il est utile d'employer celui qui a été imaginé par M. Foucault.

INTERRUPTEUR DE M. FOUCAULT. — Cet instrument est représenté en coupe et en élévation dans les *fig.* 646 et 647, *Pl. I.* Une lame de cuivre PC, qu'on peut soulever ou abaisser par une crémaillère, décrit, quand elle est dérangée de son équilibre, des oscillations qui sont plus ou moins rapides, suivant qu'on fixe un contre-poids P à diverses hauteurs. Elle entraîne dans son mouvement une tige *a*BA, qui porte en *a* un fer doux placé au-dessus d'un électro-aimant D, et en BB′ une pointe de platine. Celle-ci plonge dans un godet en verre à fond métallique, qui contient du mercure et une couche d'alcool superposée; elle est baignée par l'alcool et affleure à la surface du mercure. Une petite pile locale I envoie un courant dans le mercure du godet, de là dans le conducteur B′BC, puis dans l'électro-aimant. Celui-ci s'aimante, attire le contact *a*, soulève la pointe B′, qui sort du mercure et interrompt le courant; alors la lame PC ramène par son élasticité la pointe B′ dans le mercure et ferme de nouveau le circuit; de là résulte un mouvement continuel d'oscillation.

Occupons-nous maintenant du courant inducteur. Il est engendré par une pile I′; il passe dans un commutateur *mn* (*fig.* 647), va de *l* à un godet A, qui est disposé comme le précédent et dans lequel plonge une pointe AA′ portée par la même tige AB*a*. Si cette pointe est relevée au-dessus du mercure, le courant est interrompu; si elle est abaissée, le courant passe, vient en C, en FF′, traverse la bobine inductrice JJ, sort par H′H, revient au commutateur en *q*, et de là à la pile.

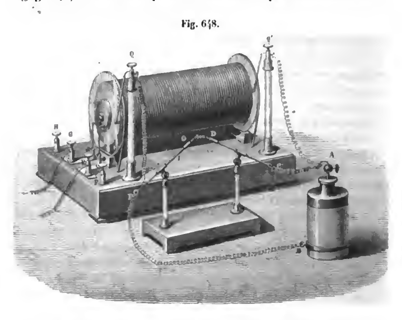
Les extrémités du condensateur sont en E′ et K′. Au mo-

ment où le courant s'interrompt, et qu'il prend son accroissement d'intensité, le fluide négatif se répand par E' dans la première armature, et le positif dans la seconde en suivant H'Hq, le commutateur, la pile I', et le conducteur lKK', mais aussitôt ces fluides se recombinent sous forme de courant qui part de K', traverse le conducteur K'Kl, le commutateur, la pile, qHH' et la bobine JJ. Les conditions sont les mêmes que précédemment.

Après ces divers perfectionnements, la machine de Ruhmkorff atteint une puissance que l'on peut indéfiniment augmenter et qui ne dépend que de la longueur de la bobine induite. Celle que possède l'École Polytechnique donne des étincelles qui se reproduisent à chaque interruption et qui atteignent 33 centimètres de longueur. M. Ruhmkorff en a construit d'autres qui sont encore plus puissantes.

Quand on interpose dans le trajet une grande jarre AB (*fig.* 648), l'électricité positive commence par s'accumuler sur

Fig. 648.

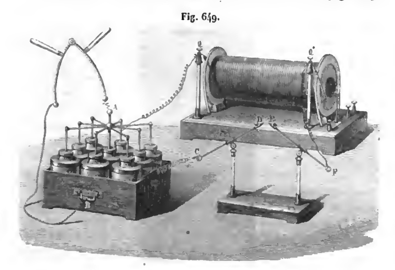


l'une des armatures A, la négative sur l'autre armature B, et toutes deux se réunissent ensuite à travers l'interruption OD

de l'excitateur universel quand la jarre se décharge. Les étincelles obtenues de cette manière sont plus nourries et moins longues, elles détonent avec un grand bruit.

On peut aussi disposer l'appareil comme dans la *fig.* 649,

Fig. 649.



mettre les extrémités Q et Q' en communication avec les armures d'une batterie AB, et interrompre le circuit en DE. Dans ce cas, l'extrémité A prend une tension permanente considérable, et par conséquent la batterie se charge presque aussi fort et plus rapidement qu'avec une machine électrique.

STRATIFICATIONS. — Toutes les fois qu'on fait passer la décharge de la machine de Ruhmkorff dans l'air raréfié, elle donne une lueur continue (*fig.* 650). De la pointe positive A on voit partir une gerbe rouge qui occupe presque toute l'étendue de l'œuf, et qui offre auprès de A un maximum d'éclat. La pointe négative C ne donne point de gerbe, elle est entourée de trois couches de lumière d'un bleu violet, qui ne s'étalent pas, et il y a toujours un espace obscur entre la gerbe et la boule C. Cette apparence change quand on introduit dans l'air raréfié des vapeurs d'alcool, d'éther, de sulfure de carbone, etc. Dans ce cas, MM. Ruhmkorff, Quet et Grove ont remarqué, presque à la même époque, que la gerbe se divise en couches

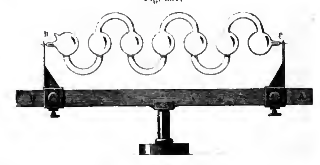
perpendiculaires à AC, qui sont alternativement lumineuses et obscures, et qui font paraître la lumière comme stratifiée.

Fig. 650.



L'expérience peut se faire avec des tubes dits de Gessler (*fig.* 651), formés par des boules et des conduits étroits, que

Fig. 651.



la lumière illumine, en présentant les mêmes particularités de stratification. Il est aujourd'hui démontré que ces courbes se

retrouvent dans toutes les décharges électriques. On ignore la cause de ce brillant phénomène.

COMPOSITION DE L'ÉTINCELLE D'INDUCTION. — L'étincelle donnée par ces grandes machines n'est pas simple, elle est composée d'un trait de feu brillant qui en occupe l'axe et d'une auréole extérieure rouge-orangé, beaucoup moins lumineuse. Les recherches de MM. du Moncel, Perrot et Lissajous ont montré de grandes différences entre ces deux parties.

1°. Le trait de feu est instantané; mais l'auréole dure pendant un temps appréciable. Pour le prouver, il suffit de faire partir l'étincelle entre deux conducteurs voisins animés d'un mouvement rapide et commun. Le trait ne change pas d'aspect et reste linéaire; mais la lueur s'étale parce qu'elle continue de se produire pendant que le conducteur se déplace et que la persistance des impressions la montre à la fois dans les diverses positions qu'occupe ce conducteur pendant qu'elle dure. Il résulte de cette différence entre le trait et l'auréole diverses conséquences aisées à prévoir.

2°. Puisque le trait est instantané et que l'auréole dure, celle-ci devra contenir la presque totalité de l'électricité qui passe. C'est ce que M. Perrot a reconnu et c'est pour cela que l'on nomme l'auréole la décharge de quantité, le trait étant la décharge de tension.

3°. Les effets calorifiques de ces deux décharges étant proportionnels à leur durée et à leur quantité d'électricité, le trait pourra percer une feuille de papier sans l'échauffer, comme le fait l'étincelle des machines électriques; mais l'auréole contenant plus d'électricité et agissant pendant plus de temps, échauffera ce papier jusqu'à l'enflammer.

4°. Une action mécanique quelconque ne produira aucun effet sur le trait à moins d'être infinie, mais elle agira sur l'auréole parce que celle-ci dure. Par exemple, si l'on dirige sur l'étincelle un courant d'air rapide, il entraîne l'auréole et la sépare du trait; de même, si l'on fait éclater l'étincelle entre deux veines liquides ou entre deux conducteurs animés d'un mouvement rapide et commun, on voit l'auréole en retard du trait.

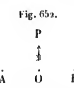
5°. Quand on condense la décharge totale dans une batterie (*fig.* 648), avant de la laisser éclater dans l'air, toute l'électri-

cité, soit celle de l'auréole, soit celle du trait, commence par charger la batterie, qui ensuite se décharge suivant les conditions ordinaires, en un seul trait de feu qui est instantané, et conséquemment plus large et plus bruyant.

ACTIONS MAGNÉTIQUES. — La décharge d'induction, tout aussi bien que l'arc voltaïque, sont des courants qui circulent à travers l'air; il en résulte qu'ils doivent éprouver les mêmes actions mécaniques que des conducteurs solides.

Soient (*fig* 652) A et B deux pôles d'aimant, et O un courant

Fig. 652.



vertical. S'il regarde A, il a sa droite vers P; s'il est tourné vers B, c'est sa gauche qui est dirigée en P. Or, entre ces deux pôles, il est dans la même situation que les courants de la roue de Barlow, et il doit être chassé vers sa droite par A, vers sa gauche par B, c'est-à-dire dans le sens de la flèche P.

M. Quet a placé l'arc voltaïque dans la position que nous venons de donner à O, entre les pôles A et B d'un électro-aimant très-énergique; cet arc s'est dévié vers P en prenant la forme d'un dard analogue à celui du chalumeau.

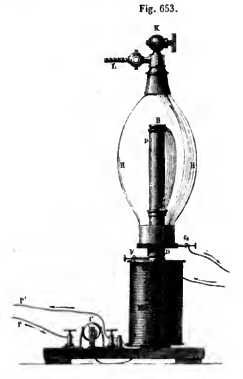
M. Perrot a remplacé cet arc par la décharge d'induction, et il a reconnu que le trait de feu n'est point influencé, ce qui tient à son instantanéité, mais que la lueur était chassée dans la direction de P, en s'étalant sous forme d'un éventail rouge.

Dans le vide, la décharge d'induction change de nature : ce n'est plus une étincelle, c'est une gerbe lumineuse qui s'étale. Probablement elle cesse d'être instantanée, le trait disparaît, et tout se transforme en auréole; alors tout est soumis à l'action magnétique.

M. de la Rive a fait disposer, dans l'œuf électrique (*fig.* 653), un morceau de fer doux AB entouré à sa base d'une bobine M et isolé à son sommet par un tube de verre DD. Au moyen d'une pile PP' on peut l'aimanter, et par une machine de

Ruhmkorff on peut faire passer par F et G du sommet au mi-

Fig. 653.



lieu de cet électro-aimant la décharge d'induction qui prend alors la forme d'une gerbe, et puisque c'est un courant, elle doit tourner autour de l'aimant : c'est en effet ce que l'expérience montre, et le sens de la rotation change avec celui de l'aimantation du fer doux.

SOIXANTE-QUINZIÈME LEÇON.

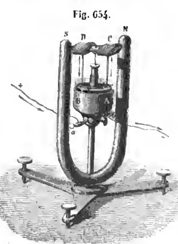
MOTEURS ET TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

Moteurs électriques. — Télégraphes électriques. — Ligne. — Manipulateur de Breguet. — Récepteur de Breguet. — Disposition d'un poste. — Télégraphe de Morse.

La possibilité d'aimanter et de désaimanter instantanément le fer par l'action des courants a conduit à construire des moteurs et des télégraphes électriques.

MOTEURS ÉLECTRIQUES. — Concevons (*fig.* 654) un aimant fixe en fer à cheval NS, entre les pôles duquel un électro-aimant CD peut tourner autour d'un axe vertical. Un godet AB, divisé en deux compartiments par une lame de verre, contient du mercure dont le niveau s'élève au-dessus de la cloison, en formant de chaque côté un ménisque convexe et sans se mêler d'un compartiment à l'autre. Les deux extrémités du fil de l'électro-aimant sont prolongées par deux pointes verticales qui affleurent sur ce mercure et peuvent, en tournant, franchir la cloison sans la toucher.

Fig. 654.

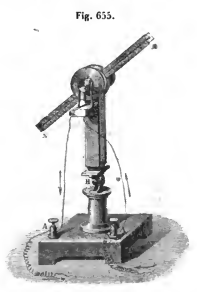


Le courant arrive par a dans le compartiment A, monte en C, continue sa route jusqu'en D et revient par B à la poupée b. Alors C et D prennent des pôles opposés à N et à S; ils sont attirés et, en vertu de la vitesse qu'ils ont acquise, ils dépassent la position axiale; mais à ce moment les deux extrémités du fil qui plongent dans le mercure franchissent la cloison et le sens du courant change

dans CD. Il en résulte que les attractions se changent en répulsions, que C et D sont attirés, le premier par S, le second par N, et que tous deux continuent leur mouvement et se retournent de 180 degrés, après cela le sens du courant redevient ce qu'il était d'abord et l'action primitive se reproduit. Il en résulte un mouvement de rotation très-rapide.

On obtient le même mouvement sous l'influence de la terre avec l'appareil dessiné *fig.* 655. MN est un électro-aimant qui peut tourner, dans le méridien magnétique, autour d'un axe

Fig. 655.



horizontal; les deux extrémités du fil dont il est enveloppé aboutissent à deux pièces B et C qui forment un commutateur. Quand le courant entre par B et sort par C, MN marche pour se placer dans la direction de l'aiguille d'inclinaison; mais au moment où il dépasse cette position par sa vitesse acquise, la ligne d'interruption de C et de B franchit les points d'appui des deux languettes et, le courant changeant de sens, MN continue son mouvement pour se retourner de 180 degrés. Comme ces inversions se reproduisent à chaque demi-révolution, la rotation est continue.

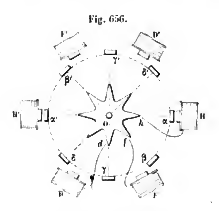
On peut mettre l'axe de rotation dans le plan du méridien magnétique, puis l'incliner au moyen d'une articulation H et

le diriger parallèlement à l'aiguille d'inclinaison; alors MN est astatique et le mouvement s'arrête.

Ces appareils ne sont que des instruments de démonstration; mais plusieurs constructeurs ont pu réaliser de véritables machines capables de produire de la force. Nous décrirons l'une de celles que M. Froment a imaginées.

Sur une roue circulaire mobile autour de O (*fig.* 656) est fixée une ceinture de huit fers doux équidistants, parallèles à

Fig. 656.



l'axe et dont les extrémités se projettent en α, β, γ,.... Chacun des angles $\alpha O \beta$, $\beta O \gamma$,..., est égal à $\frac{1}{8}$ de circonférence. Tout autour et sur un support solide et fixe sont placés six électro-aimants en fer à cheval projetés en H, F, D,..., et chacun des angles HOF, FOD,..., est égal à $\frac{1}{6}$ de circonférence. Par conséquent, lorsque deux électro-aimants H et H' sont en face de deux fers doux α et α', les suivants F et F' sont en avance d'un angle égal à $\frac{1}{6} - \frac{1}{8} = \frac{1}{24}$ de circonférence sur les fers β et β'.

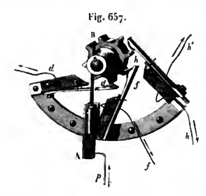
L'appareil est disposé de façon que, dans ce cas, le courant passe dans les électro-aimants F et F'; alors ils attirent β et β', lesquels se mettent en mouvement et font marcher l'appareil de $\frac{1}{24}$ de tour, après quoi β et β' sont en face de F et de F'. Aussitôt le courant cesse de passer dans F et F'; mais il est lancé dans D et D', et ainsi de suite, de façon que pendant un tour la roue mobile est soumise à vingt-quatre actions attractives qui agissent dans le même sens et seulement quand les fers sont très-près des électro-aimants.

Il nous reste à décrire le mécanisme qui produit cette distribution des courants. Il y a sur l'axe de la roue mobile une pièce portant huit dents qui correspondent aux fers doux α, β, γ, qui se meut avec eux, et qui est en communication permanente avec le pôle positif de la pile. Puis il y a trois ressorts *h*, *f*, *d* qui peuvent transmettre le courant respectivement à H et H′, F et F′, D et D′; ils sont immobiles et leurs extrémités occupent, par rapport aux dents, les mêmes positions que H, F, D, par rapport aux fers α, β, γ.

Quand α se place vis-à-vis H et dépasse cette position, une dent quitte le ressort *h*, mais la suivante touche *f* et lance le courant dans F et F′, jusqu'au moment où β se met vis-à-vis F; alors une troisième dent rencontre *d* et envoie l'électricité dans D et D′.

La *fig.* 657 représente ce distributeur dans ses conditions

Fig. 657.



réelles. Le courant arrive par AB sur l'axe O de la roue mobile; les ressorts *h*, *f*, *d* qui sont fixes, portent à leurs extrémités des pièces métalliques limitées, réglées de manière à être rencontrées successivement par les dents, à demeurer en contact avec elles pendant $\frac{1}{24}$ de tour, et à transmettre le courant dans les bobines correspondantes par des fils *hh′*, *ff′*,.... Enfin la *fig.* 658, page 330, représente l'ensemble d'une machine à laquelle manquent deux des électro-aimants qui compléteraient la ceinture, ce sont ceux qui sont marqués F′ et D′ dans la *fig.* 656. Le courant arrive par P en O, et après avoir traversé les bobines, il revient par un fil commun MMM en Q, et au pôle négatif.

Fig. 658.



TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

La télégraphie électrique est devenue un art tout entier, et comme elle est d'invention récente, elle n'a peut-être pas trouvé encore sa formule définitive. En attendant, on possède déjà des instruments qui satisfont à tous les besoins; mais ils sont extrêmement nombreux et l'on y introduit tous les jours des perfectionnements nouveaux. Dans l'impossibilité où nous sommes de faire connaître les détails de tous ces instruments, nous renverrons aux ouvrages spéciaux, particulièrement à ceux de M. Blavier et de M. Gavarret, et nous nous contenterons de décrire les télégraphes de Breguet et de Morse.

La transmission télégraphique exige trois choses : 1° un fil conducteur qui réunit les deux stations et que l'on nomme *fil de ligne* ou simplement *ligne;* 2° un instrument qui lance et

interrompt l'électricité dans des conditions déterminées et suivant une signification convenue à l'avance, c'est le *manipulateur;* 3° un autre appareil, le *récepteur,* qui reçoit à la seconde station les signaux envoyés de la première.

LIGNE. — Les lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines. Les premières, connues de tout le monde, sont constituées par des fils de fer galvanisés, tendus et supportés contre des poteaux de bois sous des auvents de porcelaine qui les isolent et les préservent de la pluie. Les secondes, employées pour le parcours des villes, sont enterrées dans des tranchées au milieu d'une masse de bitume que l'on coule autour des fils. Quant aux lignes sous-marines dont le parcours est très-étendu, elles sont formées par des fils de cuivre pour être plus conductrices, et ces fils, entourés de gutta-percha, enveloppés de filin goudronné, sont extérieurement revêtus d'un câble de fer qui leur donne toute la force nécessaire pour résister aux tractions exercées au moment de la pose et par l'effet continu des courants marins.

A la station qui envoie la dépêche, la ligne est mise en communication avec le pôle positif d'une pile, le courant la suit jusqu'au lieu d'arrivée, et s'il y avait une seconde ligne de retour, il la parcourrait en sens inverse pour revenir au pôle négatif. Mais en 1837 M. Steinheil a fait voir qu'on pouvait supprimer ce second fil, pourvu qu'on mît en communication avec la terre, dans des puits profonds et remplis d'eau, d'une part l'extrémité de la ligne au point d'arrivée, d'autre part le pôle négatif de la pile au lieu de départ. Les choses se passent donc comme si le sol remplaçait le conducteur de retour.

Cependant ce n'est point ainsi qu'il faut expliquer ce phénomène. Si la pile était isolée, elle aurait à ses deux pôles des tensions positive et négative; mais quand elle est en communication avec le sol, elle perd ces deux tensions, parce que les deux fluides se répandent et se perdent, en se disséminant dans la terre, comme dans un réservoir dont la capacité est infinie. On conçoit dès lors qu'il n'y a besoin que d'un seul fil, et que sa résistance est la moitié de celle que le courant aurait à vaincre s'il existait une ligne de retour.

MANIPULATEUR. — Cela posé, la *fig.* 659, *Pl. I,* représente l'appareil qui va écrire la dépêche. Il se compose d'une plan-

che en bois sur laquelle est un cadran fixe qui porte deux circonférences concentriques, l'une intérieure sur laquelle on voit d'abord une croix + et ensuite les vingt-cinq lettres de l'alphabet, l'autre extérieure où sont écrits 0, 1, 2,..., 25; toutes deux sont, comme on le voit, divisées en vingt-six parties.

Une manivelle OF, mobile autour du centre et qui est percée d'une fenêtre à travers laquelle on voit les lettres et les chiffres, peut être déplacée à la main; elle porte une goupille f qui s'applique et s'arrête dans les encoches extérieures f', f'', f''', suivant qu'on veut désigner les lettres A, B, C,..., ou les chiffres 1, 2, 3,..., qui alors sont vus à travers la fenêtre.

A cette manivelle est fixée une plaque de cuivre $\beta\alpha\beta'\alpha'$ dont on voit une partie au-dessous du cadran; elle est sillonnée d'une rainure $\beta\alpha\beta'\alpha'$, laquelle se rapproche du centre aux points β, β', β'',..., et s'en éloigne en α, α', α'', de façon qu'elle offre treize dépressions et treize dents obtuses.

On voit enfin une tige DD'D'', terminée en D par un ressort flexible, mobile autour de D' et portant en D'' une pointe engagée dans la rainure $\alpha\beta\alpha'\beta'$,..., dont elle est assujettie à suivre les sinuosités. De là il résulte qu'en faisant faire à la manivelle F un tour complet, on voit D'' s'éloigner treize fois du centre O, s'en rapprocher treize fois et déterminer des oscillations de DD'', pendant lesquelles le ressort D s'appuie treize fois sur un butoir C et treize fois sur un autre B.

Voici maintenant le jeu de l'appareil. A est en communication avec le pôle + d'une pile; DD'$E_1E_2G_2$ sont des conducteurs qui sont reliés avec la ligne marquée ligne 2. Lorsque la manivelle OF est placée, comme l'indique la figure, sur le signe +, il y a une interruption entre B et D et le circuit est ouvert; mais quand on transporte cette manivelle OF vis-à-vis de la lettre A dans l'encoche f', le point D'' est sur la dent α, le ressort D bute sur B et le courant passe dans la ligne. Quand on met f en f'' vis-à-vis de la lettre C, D s'éloigne de B et il y a une nouvelle interruption; et si l'on continue de faire mouvoir la manivelle OF, on voit que le courant passe quand elle est en regard des chiffres ou des lettres impairs et qu'il est interrompu quand elle s'arrête vis-à-vis des chiffres ou des lettres pairs. On voit de plus que si en partant de la position initale + on transporte rapidement OF jusqu'à une lettre de

rang quelconque, le nombre total des communications et des interruptions est égal à ce rang. On laisse ensuite la manivelle en repos pendant quelque temps vis-à-vis la lettre que l'on a atteinte, afin d'indiquer par ce repos que c'est cette lettre qu'on a voulu désigner.

RÉCEPTEUR. — Le récepteur qui est à l'autre extrémité de la ligne et en communication avec elle, a deux cadrans comme le manipulateur (*fig.* 660, *Pl. I*). Il est disposé de façon qu'une aiguille L*l* répète les mouvements que fait la manivelle OF, par conséquent de manière à franchir rapidement toutes les lettres intermédiaires et à s'arrêter sur celle que l'on veut indiquer. Nous allons montrer comment se fait cette transmission.

La *fig.* 661, *Pl. I*, représente une coupe du récepteur. L*l* est l'aiguille dont l'axe LL', constamment sollicité par un mouvement d'horloge, tend à se déplacer dans le sens ABC.... Le courant traverse une bobine B mise en communication par A + avec la ligne et par C — avec la terre, et vis-à-vis cet électro-aimant il y a un fer doux D porté par un levier mobile autour d'un point fixe; il est attiré ou ramené par un ressort *dd'*, suivant que le courant passe ou qu'il est interrompu. Il en résulte que ce levier répète exactement les mouvements que la tige DD'D" prend dans le manipulateur.

A l'extrémité E du levier DE, on voit (*fig.* 662, *Pl. I*) une tige fixe EE' engagée entre deux bras *h* et *h'* qui sont portés par un axe mobile GG'. Cet axe porte également vers son milieu deux lames K et K' qui sont dans les mêmes plans diamétraux que *h* et *h'*, et entre lesquelles se trouve la roue d'échappement *ff'f"*, laquelle a treize dents. Quand les appareils sont dans leur situation initiale, la dent *f'* est arrêtée par K. Si ensuite on place le manipulateur sur la lettre A, le courant passe, le contact DD est attiré, la tige EE' presse sur *h* et le butoir K dégage la dent *f'*. Alors la roue d'échappement se meut jusqu'à ce que la dent précédente *f* vienne rencontrer la palette K' qui s'avance pour la recevoir. Ainsi la roue marche d'une demi-dent, l'aiguille L*l* de $\frac{1}{26}$ de tour et elle se place sur la lettre A.

Si nous mettons maintenant la manivelle du manipulateur vis-à-vis la lettre B, le courant cessera de passer, le contact DD

du récepteur s'éloignera de l'électro-aimant et la tige EE' pressera sur h'; alors K' abandonnera la dent f et f'' viendra s'arrêter sur K; l'aiguille Ll tournera de nouveau de $\frac{1}{24}$ de tour et se placera vis-à-vis la lettre B. On voit qu'elle suivra tous les mouvements de la manivelle du manipulateur, qu'elle s'arrêtera comme elle sur chaque lettre qu'on voudra désigner et qu'elle indiquera successivement toutes celles qui composent un mot. On est convenu de séparer tous les mots les uns des autres, en revenant après chacun d'eux au point de départ +.

DISPOSITION D'UN POSTE. — Il nous reste à dire comment les distributions électriques sont établies dans les divers postes d'une ligne télégraphique. La ligne 1 vient d'un poste antérieur, la ligne 2 aboutit à celui qui suit; elles sont mises en communication avec les centres G_1 et G_2 de deux leviers, mobiles par deux poignées g' (*fig.* 659, *Pl. I*) et dont les seconds bras g, qui sont métalliques, peuvent se placer sur des plaques conductrices E, s et r. Mis sur E_1 et E_2, ils font communiquer les deux lignes par le conducteur ponctué E_1E_2; placés sur r, ils aboutissent au récepteur de la station; enfin, quand ils sont dirigés sur s, ils mettent chacune des lignes en rapport avec deux sonneries s_1, s_2. Nous ne décrirons pas ces sonneries, parce que tout le monde en comprendra le jeu sans en connaître les détails. Ce sont des timbres en face desquels sont des marteaux qui se mettent en mouvement au moment où un courant traverse l'appareil et fait tomber un arrêt par le jeu d'un électro-aimant.

Il faut d'abord que le préposé d'une station puisse être prévenu quand on veut lui parler de l'une ou de l'autre des stations entre lesquelles il est compris; alors il place les deux leviers en s et met ainsi l'une des extrémités de chaque sonnerie en communication avec les deux lignes, pendant que l'autre s' est en relation avec la terre par les conducteurs ponctués qui aboutissent en H. Quand un signal arrive, l'une ou l'autre des sonneries S_1 et S_2 se met en activité et le préposé est prévenu. Si le signal vient de la ligne 1, il met G_1g en communication avec E_1 et il répond qu'il attend le message; puis il transporte G_1g sur r, ce qui met la ligne en rapport avec le récepteur et il reçoit la dépêche qui lui ar-

rive. Si c'est lui-même qui veut parler au poste antérieur, il commence par mettre $G_1 g$ en contact avec E_1, puis il fait un tour entier avec la manivelle OF, ce qui lance plusieurs fois un courant dans la ligne 1 et prévient le préposé de la station à laquelle il veut écrire. Ensuite il attend avec son récepteur ouvert qu'on lui ait annoncé que sa dépêche est attendue; enfin, plaçant de nouveau $G_1 g$ sur E_1, il fait fonctionner son manipulateur.

Télégraphe de Morse. — Le manipulateur est représenté *fig.* 663, *Pl. I.* C'est un simple levier conducteur BCB′ mobile en C, toujours pressé par un ressort sur le bouton D, et qu'on peut mettre en contact avec A en appuyant sur la poignée B. La ligne communique avec C, le récepteur avec D, et la pile du poste avec A. Il est évident que pendant le repos de l'appareil, les courants qui arrivent en C sont transmis par D au récepteur. Quand, au contraire, on veut envoyer des signaux dans la ligne, on abaisse le levier sur A, alors le courant de la pile part de A, entre par C dans cette ligne et circule pendant tout le temps que le levier est abaissé. Il y a deux sortes de signaux, qu'on produit en pressant sur la poignée pendant un temps très-court ou plus long. Cela suffit, comme on va le voir, pour tous les besoins.

Le récepteur (*fig.* 664, *Pl. I*) se compose d'un électro-aimant H en face duquel est un levier de fer H′*i* qui est attiré quand le courant passe, et qui se relève par l'effet d'un ressort à chaque interruption. A l'extrémité *i* est un style qui suit tous les mouvements et qui s'enfonce quand le courant passe dans une rainure peu profonde tracée sur le contour d'un cylindre K.

Ce cylindre K reçoit un mouvement continu et lent par l'effet d'engrenages et d'un poids P, et un ruban de papier enmagasiné sur un rouleau J, qui passe entre les trois cylindres *k*, K, *k′* et qui est toujours exactement appliqué sur K, se déroule lentement pendant que l'appareil fonctionne.

Or le style *i* se relève quand un courant passe dans H; alors il presse sur le papier qu'il enfonce dans la rainure, et il y produit un trait gaufré long ou court quand le passage du courant a duré beaucoup ou peu.

Mais pour que ces impressions soient nettes, il faut que la

pression du style soit énergique et, par suite, que l'aimantation de H soit forte. Cela ne peut s'obtenir directement avec le courant de la ligne qui est faible, et il faut user d'un artifice qu'il nous reste à décrire.

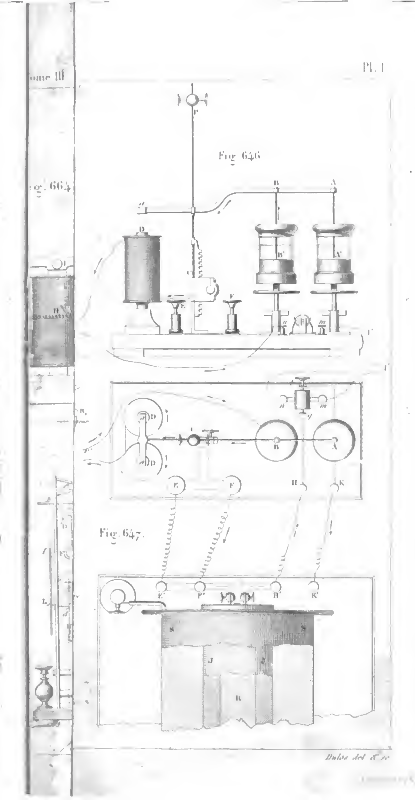
Les courants envoyés par l'autre station, après avoir traversé le manipulateur (*fig.* 663, *Pl. I*), arrivent en A (*fig.* 665, *Pl. I*) dans un appareil intermédiaire qu'on nomme *relais*. Ils circulent de A en C à travers un électro-aimant B et se rendent à la terre par C.

En face de cet électro-aimant se trouve un contact DD′ mobile en D qu'un ressort *d* éloigne quand les courants ne passent pas, mais qui vient buter contre une vis E quand ils circulent; de sorte que ce contact répète tous les mouvements du levier manipulateur, et qu'il est en communication avec E toutes les fois et pendant tout le temps que celui-ci est abaissé.

Une pile locale assez énergique a son pôle positif en communication avec E par une tige isolée *ff*. Quand la palette est au repos, le courant de cette pile est interrompu entre E et D′; mais quand elle est attirée, il passe de E en D′D, suit le conducteur $gg'g''g'''$, traverse l'électro-aimant H du récepteur et retourne par K au pôle négatif de la pile locale.

On voit donc, 1° que le levier de contact DD′ effectue les mêmes mouvements que le manipulateur; 2° que ce mouvement dirige dans le récepteur non pas le courant de la ligne qui est trop faible, mais un autre courant qui se substitue à lui, qui passe ou est interrompu en même temps et qui n'en diffère que par son intensité, laquelle est assez grande pour produire sur le papier les traces gaufrées dont nous avons parlé.

Ces traces sont courtes si le levier manipulateur a été appuyé pendant peu de temps, elles sont allongées si ce temps a été prolongé; il suffit maintenant de combiner les traits courts et allongés pour obtenir toutes les lettres de l'alphabet. Ainsi la lettre A s'exprime par - —, la lettre *b* par — - - -, *c* par — - — -, et ainsi de suite. Il suffit d'acquérir un peu d'habitude pour produire et interpréter ensuite cette écriture conventionnelle.


Fig. 646
Fig. 664
Fig. 647.
Dulos del. et sc.

